

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



ПЛАХОТНИЙ ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

УДК 621.9.048.4 : 621.9.047.7

**НАУКОВІ ЗАСАДИ КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ
ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

Спеціальність 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі енерготехнологій Черкаського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Осипенко Василь Іванович,
Черкаський державний технологічний університет,
м. Черкаси, завідувач кафедри проектування харчових
виробництв та верстатів нового покоління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лихошва Валерій Петрович,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН
України, м. Київ, завідувач відділу концентрованих
енергетичних впливів

доктор технічних наук, професор
Саленко Олександр Федорович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інституту
імені Ігоря Сікорського», м. Київ,
професор кафедри конструювання машин

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Хаскін Владислав Юрійович,
Китайсько-український інститут зварювання
ім. Є. О. Патона, м. Гуанчжоу, КНР

Захист відбудеться 27 квітня 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Дашавська, 6/2, корп. 23, ауд. 216.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денісенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «25» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15
доктор технічних наук, професор



В. М. Пащенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне машинобудування висуває жорсткі вимоги до параметрів якості і надійності продукції, що випускається. Необхідно підвищувати міцність і експлуатаційні характеристики виробів та створювати механізми, що мають малі габарити за більш високих функціональних можливостей. Одним із шляхів вирішення поставлених завдань стало використання високоміцних та температуростійких матеріалів при виробництві деталей машин і механізмів. Попит на макро- та мікрокомпоненти з таких матеріалів швидко збільшується в автомобільній, аерокосмічній, електронній, оборонній промисловості та в галузі медицини. Незважаючи на переваги використання цих матеріалів, їх обробка на лезових металообробних верстатах створює багато труднощів і найчастіше є неможливою. Адекватним рішенням цієї проблеми є застосування електрофізичних та електрохімічних методів розмірної обробки матеріалів. Одним з таких методів є електроерозійне дротяне вирізання (ЕЕДВ). В наш час воно стало одним із найпоширеніших методів високоефективної обробки завдяки своїм унікальним можливостям прецизійної обробки твердих та надтвердих струмопровідних матеріалів.

Європейські дослідники, які працюють над розвитком нового покоління верстатів ЕЕДВ, зазначають, що сучасний контекст у верстатобудівній галузі характеризується як високою швидкістю змін вимог, що висуваються об'єктивними ринками, так і технологічним прогресом конкурентів. Ключовою **науково-технічною проблемою** для розвитку технологій ЕЕДВ є, на сьогодні, підвищення точності обробки нежорстким дротяним електродом та покращення цілісності поверхні після дії іскрових розрядів. У дисертаційній роботі запропоновано, науково обґрунтовано і реалізовано новий шлях успішного **вирішення** зазначеної проблеми, який полягає в застосуванні нетермічної технології електрохімічної розмірної обробки (ЕХРО) послідовно після ЕЕДВ незмінним дротяним електродом (ДЕ).

Завдяки роботам таких вчених, як M. Datta, D. Landolt (Швейцарія), K. P. Rajurkar, D. Zhu, M. M. Sundaram, A. P. Malshe (США), J. A. McGeough, A. De Silva (Велика Британія), M. M. Lohrengel, C. Rosenkranz, F. Klocke, A. Klink, H. P. Schulze (Германія), J. Kozak, A. Ruszaj, S. Skoczypiec (Польща), А. Давыдов, В. Волгин, В. Любимов, С. И. Галанин, В. П. Житников, А. Н. Зайцев (Росія), B. Bhattacharyya, J. Munda, S. Debnath, J. Kundu (Індія), N. S. Qu, Y. B. Zeng, K. Xu, X. Fang, L. Meng, Н. Не (Китай), T. Masuzawa, M. Kunieda, W. Natsu (Японія) та інших, встановлено основні закономірності електрохімічного анодного розчинення металів і доведено переваги використання імпульсного струму за ЕХРО.

Для промислового впровадження імпульсного електрохімічного фінішування поверхні все ще потрібна подальша науково-дослідна діяльність по вдосконаленню існуючих аналітичних та чисельних математичних моделей електрохімічної обробки для більш точного кількісного опису багатопараметричних процесів анодного розчинення з метою повного використання можливостей технології. Застосування відносно тонких циліндричних дротяних електродів дає можливість локально діяти на поверхню анода завдяки суттєво сконцентрованому розподілу густини струму. Підвищенню точності і продуктивності вирівнювання поверхні сприяє зменшення міжелектродного проміжку (МЕП), який може бути строго витриманий вздовж усієї траєкторії обробки завдяки прецизійним приводам електроерозійного верстата. Єдиним обмежуючим чинником є розподіл швидкостей потоку електроліту в МЕП і його вплив на процеси масопере-

носу, які для такої технологічної схеми недостатньо промодельовані і досліджені. Не вивченими до сьогодні залишаються закономірності електрохімічного розчинення електроерозійно змінених поверхневих шарів.

Отже, реалізація комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом потребує адаптації, доповнення та узагальнення комплексу математичних моделей та результатів досліджень для створення наукових засад і є актуальною задачею, що вирішується в дисертаційній роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у Черкаському державному технологічному університеті на кафедрі енерготехнологій в рамках держбюджетних тем: «Розробка прогресивних технологій виготовлення деталей з використанням систем автоматизованого контролю» (номер державної реєстрації 0100V004420), «Створення наукових та фізико-технологічних основ оптимізації імпульсної електроерозійної обробки» (номер державної реєстрації 01030003687), «Наукові основи створення фізичних моделей формування мікрогеометрії та фізико-хімічних властивостей поверхні чотирикоординатним електроерозійним дротяним вирізанням» (номер державної реєстрації 0106U004493), «Фізико-технологічні основи керування якістю поверхні при комбінованій дротяній електроерозійній та електрохімічній обробці» (номер державної реєстрації 011U006177).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в подальшому розвитку науково-технологічних засад комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки, створенні системи багатофакторного розрахунку параметрів обладнання і технологій для досягнення максимальних технологічних характеристик процесу та отримання можливості керованого формування поверхонь з новими заданими геометричними і фізико-хімічними параметрами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз сучасного стану і напрямків розвитку електроерозійних вирізних та електрохімічних розмірних технологій обробки матеріалів.

2. Створити методологію, підібрати прилади та розробити обладнання для дослідження і моделювання фізичних, хімічних, механічних, електричних, гідродинамічних процесів у МЕР та визначення параметрів поверхонь, модифікованих електроерозійним та електрохімічним способами.

3. Створити комплекс математичних моделей і розрахунково-експериментальних методик для дослідження процесів та багатофакторного розрахунку параметрів обладнання і технологій ЕЕРДВ та ЕХРО ДЕ.

4. Використовуючи математичне моделювання та результати експериментальних досліджень, отримати, проаналізувати та узагальнити дані про закономірності формування геометрії одиничної лунки в зоні взаємодії плазми каналу іскрового розряду з матеріалом заготовки, мікрогеометрії та зони термічного впливу в поверхневих шарах сталей, утворених розрядами, характерними для електроерозійного дротяного вирізання.

5. Встановити закономірності впливу попередньої термообробки сталей на процеси анодного розчинення за ЕХРО імпульсним струмом.

6. Провести комплексні теоретичні та експериментальні дослідження впливу складу електроліту, гідралічних характеристик потоку промивання МЕР, складу та структури поверхневих шарів досліджуваних сталей, електричних параметрів джерела живлення, величини МЕР на закономірності анодного розчинення приповерхневих шарів вуглецевих та легованих сталей.

7. Використовуючи розроблені розрахунково-експериментальні методики, дослідити та проаналізувати особливості похибок формоутворення при електроерозійному дротяному вирізання.

8. Спираючись на результати теоретичних та експериментальних досліджень, запропонувати та експериментально апробувати методологію проектування технологічних процесів формування елементів складноконтурних поверхонь вуглецевих та легированих сталей з заданою точністю за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

9. Сформувати базові засади ефективного функціонування системи автоматизованого проектування та вдосконалення технологічних процесів комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом, орієнтованої на визначення областей максимальних характеристик комбінованої технології.

Об'єкт дослідження – процеси комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки незмінним дротяним електродом.

Предмет досліджень – закономірності фізичних, хімічних, гідродинамічних та механічних процесів у міжелектродному проміжку та їх вплив на параметри формоутворення (продуктивність, точність, мікрогеометрія, структура і хімічний склад поверхневих шарів) при комбінованій електроерозійній та електрохімічній обробці сплавів на основі заліза незмінним дротяним електродом.

Методи дослідження. Як теоретична база при постановці та конкретному вирішенні поставлених завдань використовуються основні положення теорії іскрового розряду, теорії розмірної електрохімічної обробки металів і сплавів, гідродинаміки, теорії теплопровідності (нестационарні процеси), математичне моделювання з використанням CFD та CAE методів, математичні методи аналізу та обробки результатів експерименту. Експерименти виконувалися на спеціалізованому комплексі для дослідження базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом з використанням сучасної реєструючої та вимірювальної апаратури.

Наукова новизна дисертаційного дослідження. В дисертаційній роботі проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень з подальшого розвитку наукових засад процесів комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

– Вперше отримано рівняння для розрахунку просторово-енергетичних характеристик джерела тепла в зоні взаємодії плазми каналу іскрового розряду з матеріалом заготовки для імпульсів технологічного струму, характерних для сучасних генераторів ЕЕДВ.

– Вперше отримано рівняння, що адекватно описують процес розширення каналу короткого іскрового розряду в середовищі водопровідної води з питомою електропровідністю 40 мкСм/см та водному розчині амфолітних поверхнево-активних речовин (АмПАР) з концентрацією 0,05%.

– Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено закономірності впливу просторово-енергетичних (густина потужності в електродній плямі, діаметр електродної плями, тривалість імпульсу) параметрів розряду та теплофізичних характеристик оброблюваного матеріалу на формування теплових полів, що визначають як процеси випаровування і плавлення матеріалу заготовки так і формування зони структурних змін у поверхневих шарах обробленої поверхні. Доведено, що розрахунковим підбором тривалості та амплітуди електричних імпульсів генератора технологічного струму можливо сформувати джерело тепла, яке здатне збільшити на 15-40% вида-

лення розплавленого матеріалу з ерозійної лунки та забезпечити кероване формування глибини зони термічного впливу.

– Вперше з використанням методології розрахунку геометрії одиничної ерозійної лунки за тривимірною моделлю теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв’язку трифазної задачі теплопровідності отримано рівняння для прогнозування параметрів шорсткості поверхонь у технологічних процесах ЕЕДВ.

– Вперше запропоновано й обґрунтовано використання в якості критеріїв оцінки локалізації процесу анодного розчинення при реалізації технологій ЕХРО ДЕ величини зони розчинення та ексцесів (E_s) розподілу густини струму й активності розчинення по поверхні анода. Доведена ефективність застосування отриманих формалізованих критеріїв для підвищення точності формоутворення поверхні складноконтурних деталей.

– Шляхом математичного моделювання вперше встановлено та експериментально підтверджено закономірності розподілу густини струму на верхній і передній гранях анода для конфігурації плоский анод – циліндричний катод за умов ЕХРО ДЕ.

– Уточнено закономірності впливу на локалізацію процесу ЕХРО ДЕ величини МЕР та обмежуючі значення максимально допустимої місцевої густини струму, підведеної до одиниці об’єму електроліту, у взаємозв’язку зі швидкістю його оновлення.

– Уточнено величини коефіцієнтів виходу за струмом залежно від густини імпульсного струму та структури, утвореної попередньою термічною обробкою матеріалу при електрохімічному розчиненні сталей У8А, ШХ15, Х12Ф1, Сталь 45.

– Набули подальшого розвитку уявлення про механізми анодного розчинення сталей з різними гомогенними та гетерогенними структурами. Встановлено, що відповідна термічна обробка може видалити всі макроскопічні сегментації карбиду, а потім встановити тонкозернисту мікроструктуру. Однорідна мікроструктура приводить до мікроскопічно рівних поверхонь сталевих субстратів після електрохімічного розчинення металу, застосовуючи високі швидкості потоку електролітів (2–5 м/с) і високу густину струму (до 100 А/см²).

Практичне значення отриманих результатів. У ході виконання дисертаційної роботи запропоновано та реалізовано загальну апаратну схему експериментального комплексу для дослідження базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом за умов, близьких до практичної реалізації конкретних завдань новітньої комбінованої технології послідовного застосування електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

На основі розрахункових та експериментальних досліджень запропоновано та реалізовано конструкцію сопла, яке забезпечує необхідні гідродинамічні характеристики подачі струменя робочої рідини в зону обробки при послідовних технологіях ЕЕДВ та ЕХРО ДЕ. Запатентовано (патент на винахід UA 117497 C2) конструкційне рішення з додатковим каналом розрахованого поперечного перерізу, що повністю усуває інжекцію повітря і стабілізує вихідний струмінь. Розроблено та реалізовано конструкції модельних осередків для експериментальних досліджень впливу гідродинаміки потоку на процеси анодного розчинення зразків. Розроблено оригінальні розрахунково-експериментальні методики досліджень:

– визначення реальної форми дротяного електрода внаслідок дії електричних розрядів та гідродинамічних сил;

– моніторингу стану МЕР через математичну обробку осцилограм напруга – струм.

Запропоновано технологічний прийом з використанням ізоляторів на ДЕІ, який при застосуванні разом з математичним апаратом розрахунку електростатичних полів зменшує величину зони нерівномірності розподілу густини струму на гранях заготовки і, відповідно, припуск на усунення зон підвищеного електрохімічного розчинення.

Розроблена САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом пройшла успішну апробацію при проектуванні технологічних процесів виготовлення полюсів квадрупольних лінз для іонних мікроскопів. Результати досліджень впроваджено у виробничих процесах підприємств: ТОВ «Черкаси-елеватормаш», ДП НВК «Фотоприлад» (м. Черкаси), ЗАТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес» (м. Запоріжжя), що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі внесок автора полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи; формулюванні мети і завдань дослідження; визначенні підходів до опису електричних, електрохімічних, гідродинамічних, теплових та механічних процесів у МЕР [1, 3, 8, 12, 14, 15, 18, 20]; створенні оригінальних розрахунково-експериментальних методик досліджень [2, 4, 9, 17, 23]; розробці комплексу математичних моделей з використанням CFD і CAE методів для досліджень та розрахунків параметрів базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом [3, 5, 10, 11, 13], а саме:

- математична тривимірна модель теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності;
- математична модель розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом і плоским анодом на основі теорії функцій комплексного змінного;
- математична тривимірна модель розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод;
- математична модель анодного електрохімічного розчинення на основі чисельного розв'язку крайової задачі з рухомими границями;
- математична модель вибору ефективної тривалості імпульсу струму для електрохімічного розчинення на основі аналітичного розв'язку нестационарного рівняння дифузії;
- математична модель поля швидкостей потоку електроліту в МЕР, характерних для комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

Автору належать загальні висновки дисертаційної роботи і такі основні положення, що захищаються:

1. Встановлені фізико-технологічні закономірності процесів утворення каналу розряду і джерела тепла на поверхні електродів, електроерозійної руйнації та формування мікрогеометрії і структури приповерхневих шарів електродів розрядами малої тривалості та енергії, характерними для сучасного ЕЕДВ.

2. Результати комплексу теоретичних та експериментальних досліджень процесів приповерхневого анодного розчинення при електрохімічній обробці мікросекундними імпульсами струму.

3. Наукові засади методів забезпечення точності формоутворення елементів складноконтурних поверхонь за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

Загальний план роботи, програму досліджень, інтерпретацію і узагальнення отриманих результатів, роботи по їх впровадженню у виробництво виконано разом з науковим консультантом д.т.н., професором В. І. Осипенком.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні наукові положення дисертації доповідалися на таких всеукраїнських та міжнародних конференціях: Міжнародная научная конференция «Практическое значение современных научных исследований» (Одеса, 2019); IX Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2019); Міжнародна науково-практична конференція «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences» (Radom, Republic of Poland, 2017); IV Міжнародна науково-технічна конференція ТК-2016 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» (Луцьк, 2016); 51-я международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Харків, 2011); Научно-техническая конференция «Аэрокосмический комплекс: конверсия и технологии» (Житомир, 1995); Конференция «Высокоэффективные технологии в машиностроении» (Харків, 1998); 4-та Українська конференція з автоматичного управління «Автоматика – 97» (Черкаси, 1997); Научно-техническая конференция «Оснастка-97» (Київ, 1997); Международная конференция, посвященная 100-летию КПИ, «Высокоэффективные технологии в машиностроении» (Алушта, 1996).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 35 праць, у тому числі 1 монографія, 22 статті у наукових фахових виданнях (з них 3 – у фахових іноземних виданнях, що індексуються в Scopus, 1 – у фаховому іноземному виданні, що індексується в Web of Science, 7 – у наукових фахових виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз даних, 3 – у фахових виданнях іноземних держав, які включено до міжнародних наукометричних баз даних, 2 – одноосібні), 1 патент України на винахід, 10 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 1 стаття в іншому виданні.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 244 найменувань і 3 додатків. Дисертація викладена на 401 сторінці, з них обсяг основного тексту – 322 сторінки, містить 166 рисунків та 19 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність напряму досліджень, сформульовано цілі і задачі дослідження, показано наукову новизну отриманих результатів і практичну цінність роботи, відображено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, наведено дані апробації, публікації і застосування результатів досліджень.

Перший розділ присвячений аналізу сучасного стану та напрямів розвитку електроерозійних вирізних та електрохімічних розмірних технологій обробки матеріалів.

Розглянуто еволюційний розвиток електроерозійної технології та встановлено, що на сьогоднішній день досягнуті граничні можливості продуктивності електроерозійного різання. Актуальними залишаються проблеми підвищення точності формоутворення нежорстким д्रोтяним електродом, зниження шорсткості поверхні та формування поверхневих шарів за ЕЕДВ.

Активну дослідницьку роботу в цьому напрямі проводять інженери ряду провідних світових виробників електроерозійного обладнання, а також науковці-дослідники. Особливості формування поверхні за дії електричних розрядів розкрито в роботах D. Patel, V. Vaghmare, Y. Suzuki, M. Kishi, Y. F. Luo, D. Ghodsiyeh, S. Sarkar, K. Kanlayasiri, S. Boonmung, P. Kumar, N. Tosun, J. G. Lopez, S. Kuriakose, M. Shunmugam, T. R. Newton, M. Dhobe, F. Klocke, I. Maher, A. Sarhan, H. Marashi, A. B. Puri,

В. Bhattacharyya та інших. Встановлено, що суто термічним методом руйнації матеріалу за дії електроіскрових розрядів повністю видалити переплавлений поверхневий шар і зону термічного впливу не вдається. Технологія застосування емульсій як робочої рідини за ЕЕДВ, запропонована в роботах Y. F. Tzeng, C. Y. Lee, R. Toshimitsu та реалізована спеціалістами компанії Sodick, не стала економічно ефективною.

Актуальною проблемою на сьогодні є пошук і розробка нетермічних методів покращення поверхні у складі комбінованої технології разом з ЕЕДВ.

Сучасні показники вихідних параметрів розмірної електрохімічної обробки імпульсним струмом свідчать про її переваги порівняно з іншими процесами фінішування поверхні і можливість ефективного застосування в поєднанні з ЕЕДВ. Окремі технологічні схеми з послідовним використанням електроерозійної обробки і електрохімічної обробки вже реалізовані, зокрема в мікрообробці.

Для ефективної реалізації комбінованої технології ЕЕДВ та ЕХРО ДЕ необхідно сформулювати наукові базові засади технології та створити комплекс математичних моделей для дослідження процесів та багатофакторного розрахунку параметрів обладнання і технологій, орієнтованих на визначення областей максимальних характеристик та отримання можливості керованого формування поверхонь з новими заданими геометричними і фізико-хімічними параметрами. Прогнозування структурних змін у поверхневих шарах після ЕЕДВ, які необхідно видалити, слід проводити на основі моделювання теплових фізичних процесів видалення матеріалу внаслідок дії іскрових розрядів. Ряд кількісних характеристик процесу електроерозійної руйнації, таких як витрати енергії на переплавлення і випаровування матеріалу, швидкість розширення каналу розряду, зміна в часі і просторі густини потужності джерела тепла, залишаються невизначеними саме для коротких електричних імпульсів, характерних для ЕЕДВ. Перехід від електрохімічної обробки до розмірної електрохімічної обробки імпульсним струмом потребує розробки більш точних міждисциплінарних математичних моделей, що реалізуються із застосуванням мультифізичних комп'ютерних обчислювальних пакетів. За ЕХРО ДЕ для технологічної схеми круглий катод – плоский анод можливо і необхідно розробити ряд математичних моделей на основі отриманих аналітичних розв'язків, в тому числі пов'язаних з особливостями анодного розчинення електроерозійно змінених поверхневих шарів після ЕЕДВ.

Отже, на сьогодні склалися передумови розробки комбінованої електроерозійної і електрохімічної технології для розмірної обробки матеріалів, яка б поєднувала високу продуктивність електроерозії і чистоту поверхні при електрохімічному розчиненні.

У другому розділі наводиться опис приладів та обладнання для проведення експериментів, обґрунтування загальної методики та методів досліджень.

Загальну схему експериментального комплексу, що використовувався в роботі для дослідження базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дрітним електродом, зображено на рисунку 1. Електроерозійний вирізний комплекс СЕЛД-02 складається з координатного позиціонера на лінійних приводах, генератора коротких імпульсів ГКІ 300-200А та станції робочої рідини. Для здійснення електрохімічної обробки комплекс доповнено джерелами живлення, які реалізують потенціостатичний і гальваностатичний режими анодного розчинення. Форма імпульсів технологічного струму задається за допомогою цифрового керуючого генератора. Також додано систему подачі електроліту в зону обробки. Для досліджень стану МЕР за допомогою цифрового осцилографа знімаються параметри струму і напруги, які далі передаються на комп'ютер і обробляються в математичних програмах.

На різних етапах досліджень експерименти проводилися також з використанням електроерозійного вирізного комплексу СЕЛД-04 з генератором МГКІ-1 виробництва фірми «Араміс» (м. Черкаси) та електроерозійного комплексу AccuteX GE-43SA виробництва ACCUTEX TECHNOLOGIES CO., LTD, Тайвань.

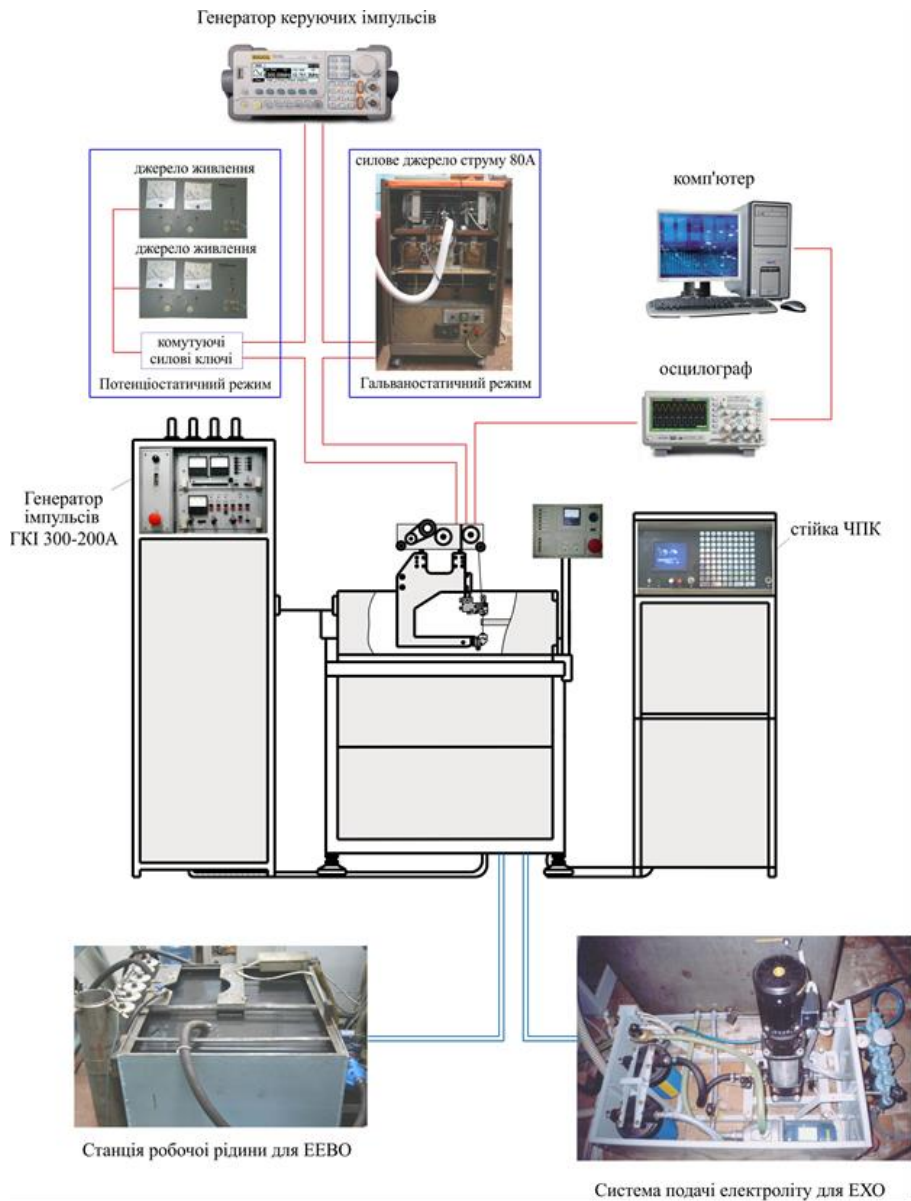


Рисунок 1 – Загальна схема експериментального комплексу

В дослідженнях використовувалися сталі, відібрані за вмістом вуглецю – доевтектоїдні, евтектоїдна та заевтектоїдні і леговані сталі, переважно штампові, які використовуються у виробництві при обробці електроерозійним методом (Сталь 45, 70Г, У8А, У12, ШХ15, ХВГ, Х12Ф1, Х12М, 4Х5МФС). Для встановлення впливу термообробки матеріалу на процеси електроерозійного різання та електрохімічного розчинення використовувалися попередньо термооброблені зразки з відповідними структурами. Для порівняння використовувалося також ARMCO залізо.

Проведено модернізацію системи подачі робочих рідин в зону обробки для реалізації комбінованої технології (рисунок 2).

Проведено модифікацію конструкції сопла. На основі чисельного моделювання й оптимізації гідродинамічних потоків усередині сопла для повного усунення шкідливих явищ інжекції повітря і забезпечення стабільності струменя на виході із сопла

отримано конструкційне рішення, на яке виданий патент на винахід UA 117497 С2 «Пристрій для подачі робочої рідини в міжелектродний проміжок».

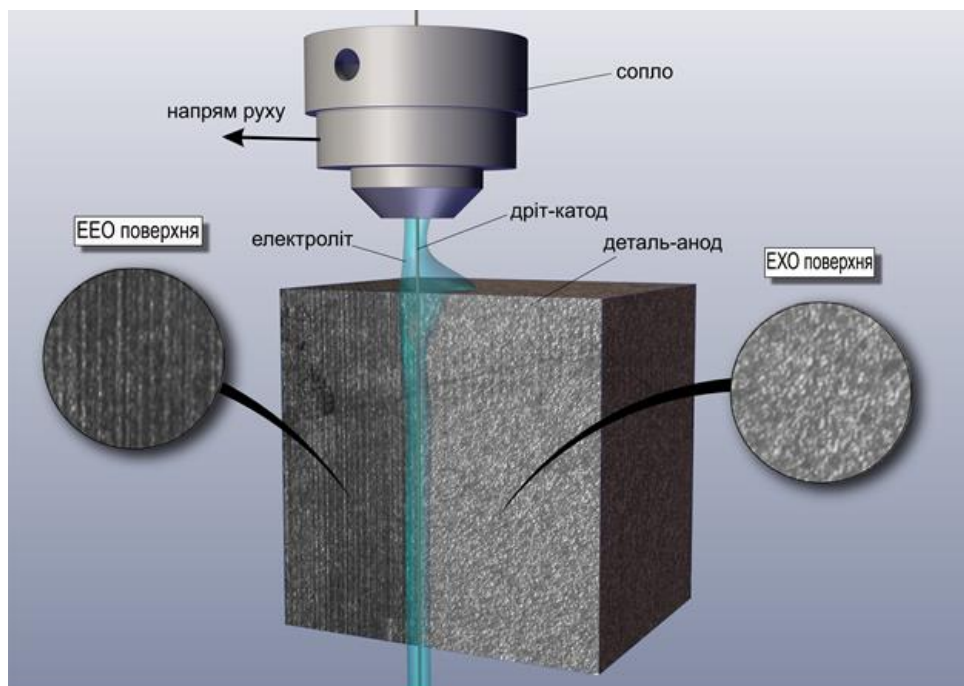


Рисунок 2 – Технологічна схема послідовних проходів ЕЕДВ та ЕХРО ДЕ

Для досліджень закономірностей впливу гідродинамічних параметрів потоку електроліту на процеси анодного розчинення циліндричних зразків розроблено та використано електрохімічні комірки з радіальним відцентровим потоком електроліту та з плоскопаралельним потоком електроліту. Планування експериментів на комірках проводилося з використанням математичного інструментарію чисельного розрахунку гідродинамічних параметрів потоку електроліту всередині комірок та математичних моделей анодного розчинення.

В роботі використовувалися в основному порівняно неагресивні електроліти у вигляді водних розчинів NaCl та NaNO_3 з концентрацією в діапазоні 0,5–2,3 М при температурі 27–35°C, електропровідність яких контролювалася за допомогою кондуктометра-солеміра ОАКТОН TDS5 з додатковим електродом для розширення межі діапазону вимірювання (коефіцієнт комірки електрода $K = 15,5$).

Багатопараметричний аналіз мікрогеометрії поверхні здійснювався за допомогою профілографа TIME 3221 з програмним забезпеченням DataView TIME3R Series.

Макрорельєф вертикальних канавок на поверхні зразків в експериментах анодного розчинення з нерухомим дротяним електродом знімався за допомогою розробленого оригінального пристрою зі щупом, оснащеним лазерним тріангуляційним вимірювачем RIFTEK RF603. Обробка даних і візуалізація рельєфу канавок проводилися за допомогою розроблених програм у середовищі математичного пакета MathCAD.

Відхилення форми виготовленої поверхні від заданої досліджувалося за допомогою координатно-вимірювальної машини Coordinate Measuring Machine 3D CMM AXIOM CNC ABERLINK та відповідного програмного забезпечення. Гранично допустима похибка – $\pm (1,8 + 0,4 L/100)$ мкм, де L – довжина, що вимірюється, мм.

В роботі розроблено оригінальні розрахунково-експериментальні методики досліджень, що мають самостійне практичне значення для проектування і реалізації технологічних процесів за комбінованою технологією ЕЕДВ та ЕХРО.

Методика вимірювання реальної форми дротяного електрода та визначення рівня сил від дії електричних розрядів та гідродинамічних сил, що зумовили прогин дроту.

Координати лінії прогинів (позиція 6, рисунок 3) знімаються за допомогою двокоординатного вимірювального мікроскопа ДПІ-3. Оптичне наведення на вимірювану кромку дає змогу визначити координати з похибкою, яка не перевищує $\pm (1,0 + L/200)$ мкм, де L – вимірюваний розмір у міліметрах.

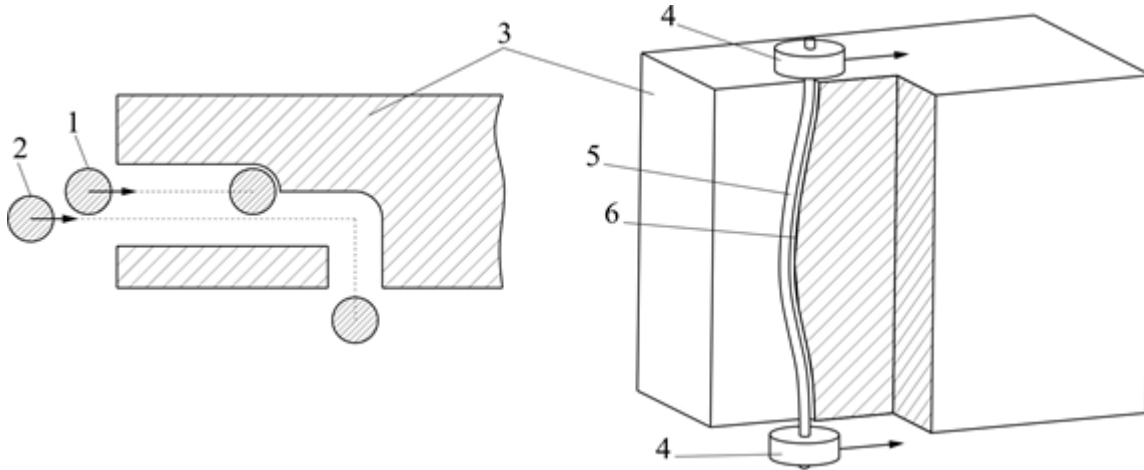


Рисунок 3 – Визначення реальної форми прогинів дротяного електрода:

- 1 – перший чорновий різ повного знімання; 2 – другий різ зі зміщенням; 3 – заготовка;
4 – напрямні; 5 – дротяний електрод; 6 – лінія прогинів, що вимірюється

Математична модель, розрахункова схема якої зображена на рисунку 4, а форма дроту електрода описується формулою

$$y(z) = \frac{l}{2H_0} \left\{ \frac{z}{l} \left[q_1((l-a)^2 - (l-b)^2) + \frac{q_2 - q_1}{3(b-a)}((l-a)^3 - (l-b)^3) \right] - \right. \\ \left. - q_1((z-a)^2 - (z-b)^2) - \frac{q_2 - q_1}{3(b-a)}((z-a)^3 - (z-b)^3) \right\}, \quad (1)$$

де необхідно покласти $(z-a) = 0$ при $z < a$ і $(z-b) = 0$ при $z < b$, задіяна в цій методиці як «обернена задача». Використовуючи експериментально виміряну форму дротяного електрода, з математичної моделі визначалося діюче розподілене поперечне навантаження для конкретних технологічних умов електроерозійного різання.

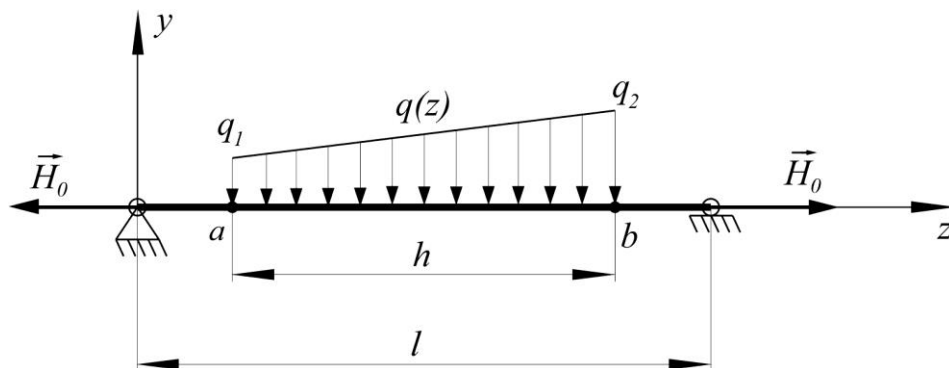


Рисунок 4 – Розрахункова схема прогинів дротяного електрода при різних швидкостях руху точок a і b : l – відстань між вузлами фіксації дроту; h – висота оброблюваної деталі;
 H_0 – натяг на розтяг нитки; $q(z)$ – розподілене поперечне навантаження

Експериментально-розрахункова методика оцінки гідродинамічних сил, що діють на дротяний електрод, викликаних потоком рідини промивки. Застосовується спеціальне обладнання для вимірювання тиску робочої рідини вздовж довжини паза, що прорізується. Далі розраховується силове навантаження, спричинене падінням тиску між передньою ріжучою і задньою поверхнями дротяного електрода за формулами, які описують гідродинамічні параметри потоку рідини для щілинних зазорів.

Методика моніторингу стану МЕП шляхом математичної обробки осцилограм напруга – струм в режимі реального часу при роботі технологічного комплексу за ЕХРО ДЕ. За схемою, наведеною на рисунку 5, отримували осцилограми зміни потенціалу анода при збуренні електрохімічної системи послідовністю прямокутних уніполярних імпульсів струму.

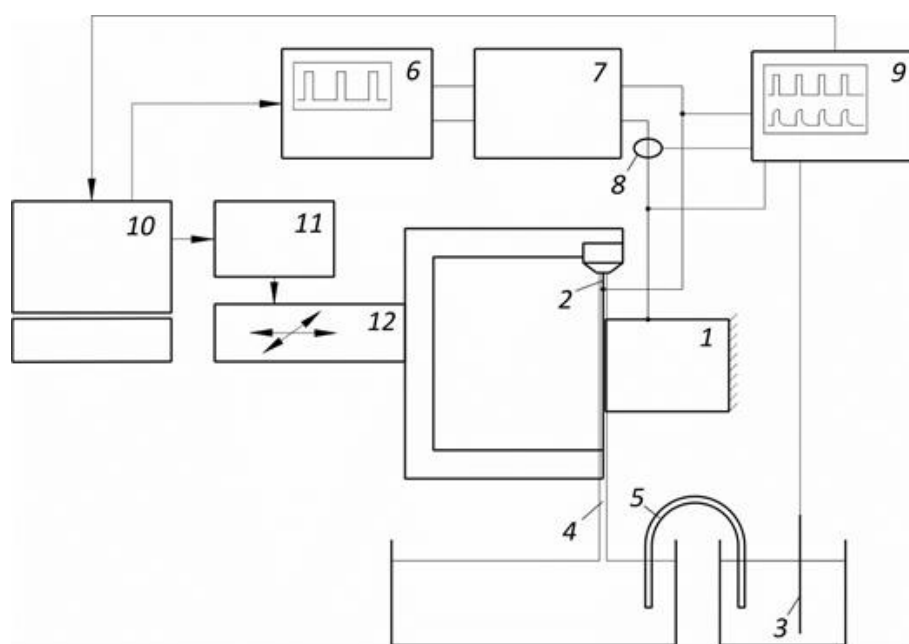


Рисунок 5 – Схема обладнання для контролю стану МЕП за ЕХРО ДЕ: 1 – анод, 2 – катод, 3 – платиновий електрод порівняння, 4 – електроліт, 5 – електролітичний ключ, 6 – керуючий генератор імпульсів, 7 – джерело струму, 8 – датчик струму, 9 – осцилограф, 10 – комп'ютер з програмним забезпеченням, 11 – стійка числового програмного керування, 12 – позиціонер

Далі на основі еквівалентної схеми заміщення межі розділу анод – розчин електроліту і побудованої функції відгуку за операторним методом з використанням перетворення Лапласа знаходяться числові значення параметрів схеми при проходженні прямокутних імпульсів струму шляхом апроксимації ділянок з перехідними процесами на знятій осцилограмі анодної поляризації.

За зміною величин питомої ємності та опорів на передньому та задньому фронтах при проходженні серії імпульсів технологічного струму відбувається контроль накопичення залишкової поляризації, зашламленості МЕП та ін. В разі появи таких негативних явищ у ході ЕХРО оперативно проводиться корекція амплітудно-часових параметрів джерела живлення для підтримання процесу в штатному режимі.

Як дослідницький математичний інструмент в роботі використано ряд математичних моделей, що описують основні процеси за ЕЕДВ та ЕХРО.

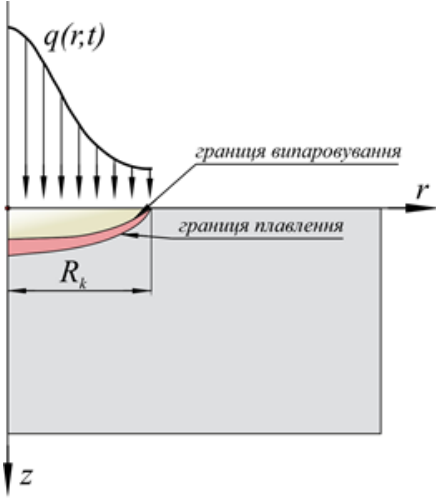


Рисунок 6 – Розрахункова
схема моделі

Математична тривимірна модель теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку нестационарної трифазної задачі теплопровідності з рухомими границями використовувалась для кількісного опису процесів руйнування матеріалу внаслідок дії одиничних іскрових розрядів.

Розглядалися два рухомі фазові фронти, один із яких внутрішній – між твердою і рідкою фазою матеріалу, другий – зовнішній, між рідкою фазою і областю випарованого матеріалу (рисунок 6).

У циліндричній системі координат диференціальні рівняння теплопровідності мають вигляд

$$\rho_i(T) \cdot C_i(T) \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_i(T) \cdot r \cdot \frac{\partial T_i}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right], \quad (2)$$

де $i = 1, 2, 3$ – індекси температури T і теплофізичних параметрів для, відповідно, твердої, рідкої та газоподібної фаз матеріалу; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $C(T)$ – теплоємність, $\rho(T)$ – густина, t – час.

$$\text{Крайові умови: } T \Big|_{t=0} = T_0; \quad q \Big|_{z=0, r \leq R_k} = q(r, t); \quad q \Big|_{z=0, r > R_k} = 0. \quad (3)$$

Остання умова прийнята на основі припущення про утворення повітряної бульбашки порівняно великих розмірів в околі зони іскрового розряду. Інші поверхні деталі досить віддалені і приймаються теплоізованими: $q \Big|_{z=p} = 0$.

$$\text{В зоні фазового переходу: } \rho = \theta \cdot \rho_1 + (1 - \theta) \cdot \rho_2, \quad (4)$$

$$\rho H = \theta \cdot \rho_1 \cdot H_1 + (1 - \theta) \cdot \rho_2 \cdot H_2, \quad (5)$$

$$\lambda = \theta \cdot \lambda_1 + (1 - \theta) \cdot \lambda_2, \quad (6)$$

де $\theta = 1$ при $T < T_{12} - \Delta T/2$, $\theta = 0$ при $T > T_{12} + \Delta T/2$ – аналог функції Хевісайда.

$$\text{Теплоємність: } C = \frac{1}{\rho} (\theta \cdot \rho_1 \cdot C_1 + (1 - \theta) \rho_2 \cdot C_2) + C_L, \quad (7)$$

де $C_L(T) = (H_2 - H_1) \frac{d\alpha_m}{dT}$; $H_2 - H_1 = L$ – прихована (латентна) енергія плавлення;

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 - \theta) \cdot \rho_2 - \theta \cdot \rho_1}{\rho} \text{ – частка маси.}$$

Розподіл теплового потоку $q(r, t)$ за умов ЕЕДВ може бути представлений формулою

$$q(r, t) = 4.5 \cdot q_r(t) \cdot e^{-4.5 \frac{r^2}{R_k^2}}, \quad (8)$$

де R_k – радіус дії каналу розряду; r – поточна відстань від центру джерела тепла; $q_r(t)$ – залежність амплітуди густини теплового потоку від часу дії розряду:

$$q_r(t) = \frac{k \cdot U(t) \cdot I(t)}{\pi \cdot R_k^2}, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт, що визначає частку потужності, яка прикладена до заготовки; $U(t)$ – залежність амплітуди напруги від часу дії розряду; $I(t)$ – залежність амплітуди струму від часу дії розряду.

Залежність амплітуди напруги та струму від часу визначалась за реально знятими оцифрованими осцилограмами в ході натурного експерименту.

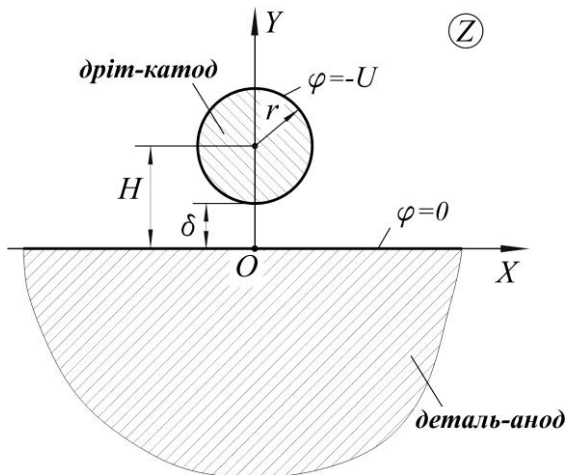


Рисунок 7 – Розрахункова схема за електрохімічної обробки плоского анода дротяним катодом

Математична модель розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом і плоским анодом на основі теорії функцій комплексної змінної представлена у вигляді точного аналітичного розв'язку для технологічної схеми ЕХРО дротяним електродом.

Комплексний потенціал

$$W(Z) = \Phi(X, Y) + i\Psi(X, Y), \quad (10)$$

де $\Phi(X, Y)$ – потенціал електричного поля, $\Psi(X, Y)$ – функція струму, задовольняє рівняння Лапласа та граничні умови на аноді та катоді (рисунок 7), якщо функції $\Phi(X, Y)$, $\Psi(X, Y)$ задовольняють умови Коші-Рімана:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X} = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial Y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}. \quad (11)$$

Через функцію $\Phi(X, Y)$ виражається напруженість електричного поля:

$$\vec{E} = \text{grad} \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial X} + i \frac{\partial \Phi}{\partial Y} = E_x + E_y = \frac{dW}{dZ}. \quad (12)$$

Густина струму виражається через \vec{E} за законом Ома:

$$\vec{j} = \kappa \vec{E}, \quad (13)$$

де κ – питома провідність електроліту.

Процес розчинення в кожній точці поверхні анода визначається законом Фарадея:

$$\Delta H = K_v \cdot j \cdot \Delta t \cdot \eta = K_v \cdot \kappa \cdot E_n \cdot \Delta t \cdot \eta, \quad (14)$$

де ΔH – товщина шару матеріалу анода, знятого за короткий проміжок часу Δt , K_v – коефіцієнт електрохімічного розчинення матеріалу анода, E_n – нормальна до поверхні анода складова вектора напруженості електричного поля, η – вихід по струму, який приймається постійним або функцією густини струму.

Для випадку конфігурації електродів плоский анод – круглий катод (рисунок 7), що являє собою горизонтальний переріз області обробки прямолінійної ділянки дедалі дротяним циліндричним електродом радіуса r з міжелектродним проміжком δ , параметри поля виражаються наступним чином:

комплексний потенціал $\varphi = w = \frac{U}{\ln p} \ln(z - ia) - \frac{U}{\ln p} \ln(z + ia),$ (15)

де $a = \sqrt{H^2 - r^2}; p = \frac{a - \delta}{a + \delta};$

напруженість поля: $\vec{E} = \frac{U}{\ln p} \left(\frac{1}{z - ia} - \frac{1}{z + ia} \right).$ (16)

Виділивши дійсну і уявну частини, отримаємо вирази для складових E_x, E_y .

Густина струму: $j_x = \kappa E_x; j_y = \kappa E_y.$ (17)

Максимальне значення густини струму на поверхні анода при $x = 0, y = 0$:

$$j_{\max} = \frac{2U\kappa}{a \ln p}. \quad (18)$$

Лінійне знімання матеріалу анода: $h_x = K_v \cdot j_x \cdot \Delta t \cdot \eta; h_y = K_v \cdot j_y \cdot \Delta t \cdot \eta.$ (19)

Математична тривимірна модель розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод побудована на основі чисельного розв'язку рівняння Нернста-Планка, що описує перенесення маси носіїв заряду у водних розчинах електролітів:

$$\vec{N}_i = -D_i \nabla c_i + c_i \vec{u} - z_i m_i F c_i \nabla \phi_l, \quad (20)$$

де \vec{N}_i – потік іонів i -того виду, D_i – коефіцієнт дифузії, c_i – концентрація іонів, \vec{u} – вектор швидкості, z_i – валентність, m_i – рухливість іонів, F – стала Фарадея, ϕ_l – електролітичний потенціал.

Вектор густини струму виражається через суму потоків іонів усіх видів в електролітичній системі

$$\vec{j} = F \sum_i z_i \vec{N}_i, \quad (21)$$

або
$$\vec{j} = F \left(\sum_i -z_i D_i \nabla c_i + \vec{u} \sum_i z_i c_i - \nabla \phi_l \sum_i (z_i)^2 m_i F c_i \right). \quad (22)$$

Для нейтрального електроліту $\vec{j} = F \left(\sum_i -z_i D_i \nabla c_i - \nabla \phi_l \sum_i (z_i)^2 m_i F c_i \right). \quad (23)$

Останнє рівняння використовується при розрахунках третинного розподілу струму в електрохімічних системах для збереження нелінійного заряду та/або залежної від концентрації поляризації електрода. Для технологічних процесів електрохімічної обробки, де проходить поверхневе розчинення, перший доданок у дужках рівняння (23) може бути проігнорований у зв'язку з припущенням про відсутність зміни концентрації в об'ємі електроліту.

Для первинного і вторинного розподілу струму характерним є такий вираз:

$$\vec{j} = - \underbrace{\left(F \sum_i (z_i)^2 m_i F c_i \right)}_{\kappa = \text{провідність}} \nabla \phi_l, \quad \text{або} \quad \vec{j} = -\kappa \cdot \nabla \phi_l, \quad (24)$$

де κ – питома провідність електроліту. Рівняння (24) є, по суті, однією з форм закону

Ома, що свідчить про омичний характер транспортування зарядів в електроліті з урахуванням вищезазначених припущень.

Збереження заряду описується рівнянням

$$\nabla \cdot (-\kappa \nabla \phi_i) = 0. \quad (25)$$

Отже, математична модель розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод реалізується шляхом отримання чисельного розв'язку вищенаведених рівнянь методом скінченних елементів (МСЕ) з урахуванням граничних умов на поверхнях електродів заданої конфігурації.

Математична модель анодного електрохімічного розчинення на основі чисельного розв'язку крайової задачі з рухомими границями реалізується в комп'ютерній розрахунковій системі шляхом поєднання знайденого в кожний момент часу розподілу густини електричного струму зі зміною поверхні розчинення. Функціональним принципом ЕХРО є анодне розчинення металевих зв'язків за рахунок транспортування електричного заряду Q згідно з законом Фарадея. Об'єм вилученого матеріалу V розраховується за формулою

$$V = \eta \cdot \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot Q, \quad (26)$$

де η – ефективність виходу за струмом, M – молярна маса матеріалу, що розчиняється, ρ – густина, z – електрохімічна валентність матеріалу, F – стала Фарадея. Швидкість видалення матеріалу в напрямку по нормалі \vec{v}_n залежить від густини струму в напрямку по нормалі \vec{J}_n :

$$\vec{v}_n = \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot \vec{J}_n \cdot \eta(J). \quad (27)$$

При використанні активуючих і пасивуючих електролітів і різних за хімічним складом матеріалів анода коефіцієнт виходу за струмом може залежати від значення густини струму. Зокрема, якщо існує пасивна область, в якій матеріал не буде розчинятися при низьких густинах струму, то цей факт враховується шляхом введення функції

$$\eta(J) = \begin{cases} 1, & \text{при } J > J_{\min}, \\ 0, & \text{при } J \leq J_{\min}; \end{cases} \quad (28)$$

де значення J_{\min} встановлюється за додатковими експериментами з електролітами і матеріалами, що відповідають параметрам моделювання.

Математична модель поля швидкостей потоку електроліту в МЕП, характерних для комбінованої електроерозійної і електрохімічної обробки дротяним електродом, використовувалась як обчислювальний інструментарій для тривимірного просторового моделювання гідродинамічних параметрів потоку з залученням сучасних CFD програмних пакетів обчислювальної гідродинаміки.

Математична модель базується на чисельному розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса для в'язкої нестисливої суцільної рідини:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{v} = \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla (\mu \nabla \vec{v}) + \vec{S}, \quad (29)$$

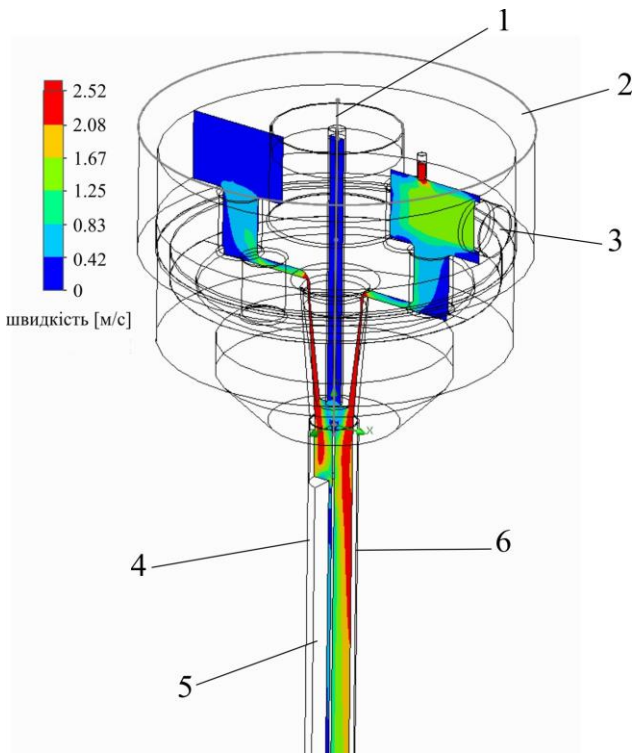


Рисунок 8 – Розрахункова схема:

1 – дріт-катод; 2 – сопло; 3 – вхід електроліту; 4 – деталь-анод; 5 – поверхня деталі; 6 – розрахункова область струменя

дричний формі навколо дротяного електрода. На зовнішній стінці гранична умова – прозора стінка:

$$p|_{cp} = p_{env}; v|_{cp} = v_{\tau}|_{cp} \text{ при } (\vec{v}, \vec{n}) > 0, \nabla(v_i, \vec{n})|_{cp} = 0 \text{ при } (\vec{v}, \vec{n}) \leq 0. \quad (31)$$

На вертикальній поверхні анода, вздовж якої проходить основний рух електроліту, задано граничні умови – стінка з шорсткістю, характерною для поверхні після першого чорнового проходу електроерозійного дротяного вирізання ($Ra = 2.5-3$ мкм). Величина шорсткості визначає положення точки переходу від ламінарного пограничного шару до турбулентного. Поверхня дротяного електрода – стінка з проковзуванням:

$$v_n|_{cp} = 0, \frac{\partial v_{\tau}}{\partial n}|_{cp} = 0, \quad (32)$$

тут v_n, v_{τ} – нормальна і тангенціальна складові вектора швидкості, \vec{n} – вектор нормалі до границі.

Математична модель для вибору ефективної тривалості імпульсу струму для електрохімічного розчинення побудована на основі аналітичного розв’язку нестационарного рівняння дифузії

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C = D \nabla^2 C. \quad (33)$$

де \vec{v} – векторне поле швидкостей, t – час, p – тиск, ρ – густина, μ – динамічна в’язкість, \vec{S} – масові сили; доповнених рівняннями суцільності середовища:

$$\text{div} \vec{v} = 0. \quad (30)$$

Не врахований вплив температурних змін та кінетики процесів анодного розчинення на втрату енергії потоку рідини. При переході потоку від ламінарного стану до турбулентного використано стандартну $k-\epsilon$ модель на основі рівнянь переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації.

Як граничні умови задавався тиск електроліту на вході в сопло (рисунок 8). Водночас додатково розраховується потік всередині сопла. Це займає певну частину розрахункового часу, але дає точний, адекватний реальному розподіл поля швидкостей на виході сопла – граничні умови на початку струменя. Ці умови не є повністю осесиметричними в цьому конструктивному виконанні сопла.

Розрахункову область вибрано у цилін-

$$\text{Крайові умови: } C = C_\infty \text{ при } t = 0; C = C_\infty \text{ при } x \rightarrow \infty; \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{i(t)}{nFD} \text{ при } x=0, \quad (34)$$

де D – коефіцієнт дифузії іонного компонента, \vec{v} – швидкість електроліту, C_∞ – значення концентрації далеко від електрода (в об'ємі електроліту), n – кількість електронів, які перенесені в електродній реакції, F – стала Фарадея.

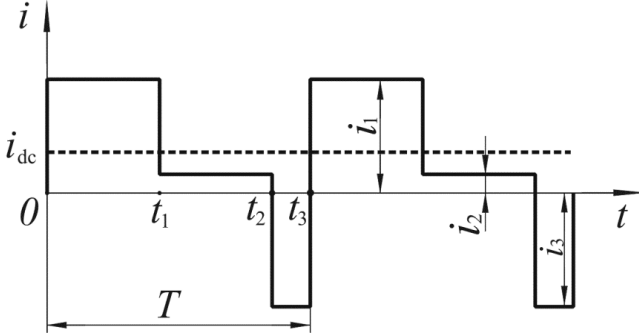


Рисунок 9 – Узагальнена форма технологічного струму $i(t)$: i_1 – анодний імпульс струму, i_2 – низький струм релаксаційного періоду, i_3 – короткий катодний імпульс струму

Представимо імпульсний струм (рисунки 9), який проходить через поверхню розділу електрод/електроліт, у вигляді суми усередненої по часу постійної складової i_{dc} і змінної складової коливального струму i_{ac} :

$$i(t) = i_{dc} + i_{ac}(t), \quad (35)$$

тут середня постійна густина струму:

$$i_{dc} = \frac{1}{T} [i_1 t_1 + i_2 (t_2 - t_1) + i_3 (t_3 - t_2)],$$

змінна густина струму на трьох ділянках:

$$i_{ac}(t) = \begin{cases} i_1 - i_{dc} & \text{при } 0 < t < t_1, \\ i_2 - i_{dc} & \text{при } t_1 < t < t_2, \\ i_3 - i_{dc} & \text{при } t_2 < t < t_3. \end{cases}$$

$$\text{Аналогічно можна представити концентрацію: } C(x, t) = \bar{C}(x) + \tilde{C}(x, t), \quad (36)$$

де $\bar{C}(x)$ – стала концентрація, що встановилася, $\tilde{C}(x, t)$ – змінна концентрація.

Підставляючи (36) в (33), отримаємо два диференціальні рівняння для складових концентрації, розв'язками яких будуть:

$$\bar{C}(x) = -\frac{i_{dc}}{nFD} x + C_\infty + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta, \quad \tilde{C}_s(t) = -\frac{1}{nF} \int_0^t Y(t-u) \cdot i_{ac}(u) du, \quad (37)$$

де $Y(t) = \frac{2}{\delta} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{\pi^2 D}{\delta^2} (m - \frac{1}{2})^2 t}$, δ – товщина дифузійного шару: $\delta_n = \sqrt{\pi D T}$ – за потенціостатичного режиму; $\delta_e = 2 \sqrt{\frac{DT}{\pi}}$ – за гальваностатичного режиму; $\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{vH}{v}} \cdot \left(\frac{D}{v}\right)^{\frac{1}{3}}$ –

з урахуванням швидкості v руху електроліту по електроду, де v – кінематична в'язкість електроліту, H – відстань від початку контакту потоку, що набігає, з поверхнею анода.

Із умови падіння до нуля концентрації на поверхні анода

$\bar{C} \Big|_{x=0} = C_\infty + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta = 0$ знайдемо $i_{lim} = -\frac{nFDC_\infty}{\delta}$ – обмежуючу величину густини постійного струму.

Прирівнявши до нуля вираз для повної поверхневої концентрації

$$C_s^* = 1 - i_{dc}^* - \frac{1}{nFC_\infty} \int_0^{t^*} Y(t^* - u) \cdot i_{ac}(u) du = 0,$$

отримаємо формулу для визначення гранично допустимої густини струму i_{PL} .

Для ефективної обробки з максимальним значенням коефіцієнта виходу за струмом необхідно виконання умови

$$i_{\max} \approx i_{PL}, \quad (38)$$

де i_{\max} – максимальна густина струму для випадку циліндричного дрітцяного катода і плоского анода, що обрховується за формулою (22).

Отримані аналітичні формули внесені у програмний математичний пакет MathCAD, і розрахунки є доступними для використання в інженерній практиці при проектуванні технологічних процесів електрохімічної обробки з використанням імпульсного струму.

Третій розділ присвячено встановленню фізико-технологічних закономірностей електроерозійної руйнації та формування приповерхневих шарів електродів розрядами малої тривалості та енергії, характерними для електроерозійного дрітцяного вирізання (таблиця 1).

Таблиця 1 – Параметри генераторів коротких імпульсів, що використовуються для ЕЕДВ

№ з/п	Виробник, модель	Код режиму	E_i , мДж	I_A , А	τ_i , мкс
1	НВО «Ротор», ГКІ 300-200А	2–2	2,45	85	7,1
2	НВО «Ротор», ГКІ 300-200А	2–3	3,3	111	9
3	НВО «Ротор», ГКІ 300-200А	3–4	0,78	30	2,1
4	«Араміс», МГКІ-1	4	4,78	125	1,85
5	AccuteX GE-43SA	2	1,24	100	0,1
6	AccuteX GE-43SA	4	5,4	250	0,2
7	AccuteX GE-43SA	7	26	700	0,5
8	Agie Charmilles CUT 20P	6	26,3	800	1,2

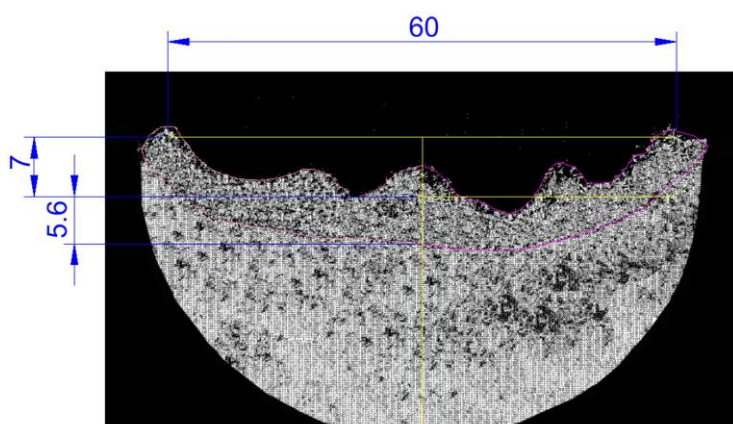


Рисунок 10 – Мікрошліф перетину ерозійної лунки (сталь 12X18H10): $V_{\text{вип}} = 1,09 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$, $V_{\text{перепл}} = 2,04 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$ (розміри в мікрометрах)

Використовуючи математичне моделювання та результати експериментальних досліджень, встановлено кількісний взаємозв'язок параметрів у формулах (8), (9) з характеристиками утвореної лунки. І навпаки, використовуючи розв'язок оберненої задачі теплопровідності й експериментально отримані параметри ерозійної лунки, визначалися коефіцієнти k – частка теплової енергії, що надходить до заготовки, та R_k – радіус дії каналу розряду для конкретних технологічних режимів ЕЕДВ.

Відправними фактичними даними слугували експериментально зняті осцилограми напруги та струму за час проходження розряду, тобто амплітудно-часові параметри енергії, підведеної в МЕП, і отримані з мікрошліфа геометричні характеристики перетину ерозійної лунки, утвореної цим розрядом (рисунок 10).

Далі проводився обчислювальний експеримент з варіацією вхідних параметрів – частки енергії, яка йде на теплове руйнування анода, і віртуального радіуса джерела тепла. Вони вибирались так, щоб геометричні розміри лунки та зони розплаву, отримані в розрахунку (рисунок 11), максимально наблизились до відповідних параметрів, визначених за мікрошліфом перетину ерозійної лунки.

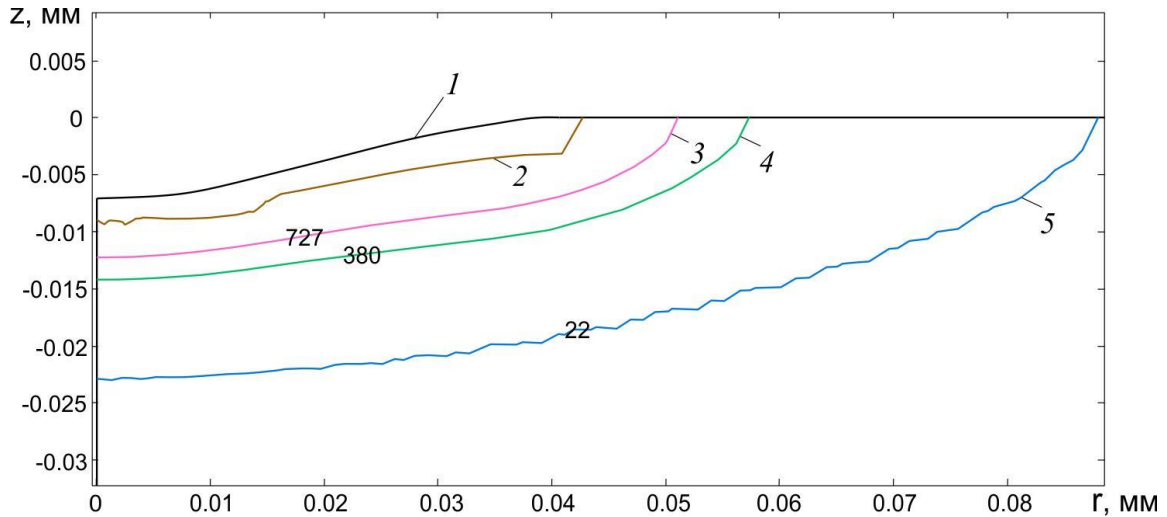


Рисунок 11 – Результати розрахунку форми ізофазних поверхонь та ізоТерм теплових полів в аноді, утворених внаслідок дії одиничного розряду: 1 – границя випарованого матеріалу, 2 – границя розплавленого матеріалу, 3–5 – ізоТерми на момент припинення розряду

Таким чином, вперше запропоновано експериментально-розрахункову методологію, яка ґрунтується на адаптивному узгодженні результатів точних експериментальних досліджень з даними обчислювального експерименту з варійованими вхідними параметрами та є ефективним інструментом наукових досліджень теплових процесів руйнації матеріалу електрода і дає змогу достатньо адекватно оцінювати параметри джерела тепла, сформованого одиничним іскровим розрядом.

На основі цієї методології встановлено, що запропонована японськими вченими Т. Ікаї, І. Фуґіта, К. Нашіґучі формула для визначення зростаючого з часом радіуса введення тепла: $R(t) = 2.04 \cdot 10^{-3} \cdot I^{0.43} \cdot t^{0.44}$, де I [А] – миттєве значення амплітуди струму, t [мкс] – плинний час від початку розряду, яка широко використовується багатьма дослідниками в сучасному моделюванні процесів електроерозійної обробки з довготривалими іскровими розрядами 300–500 мкс та амплітудним значенням струму 16–26 А, абсолютно не застосовна для короткотривалих розрядних імпульсів з високим значенням амплітуди струму, характерних для ЕЕДВ.

Німецькі вчені G. Spur та J. Schonbeck запропонували універсальну формулу зростання з часом радіуса плазмового каналу для коротких (1–4 мкс) електроерозійних імпульсних розрядів:

$$R(t_a, t) = \begin{cases} a + bt, & \text{за } 0 \leq t \leq t_a, \\ R(t_a, t_a) + c \cdot (t - t_a), & \text{за } t_a < t \leq 2t_a; \end{cases} \quad (39)$$

де t_a – момент часу закінчення зростання струму розряду, a , b та c – коефіцієнти лінійної функції, що описують поведінку струму на ділянках його зростання і спадання відповідно, залежно від рідкого середовища, в якому відбувається розряд.

Для електроерозійних іскрових розрядів у середовищі деіонізованої води, в якому працюють зарубіжні електроерозійні вирізні верстати, формула (39) набуває вигляду:

$$R(t_a, t) = \begin{cases} 17.14 + 31.43t, & \text{за } 0 \leq t \leq t_a, \\ R(t_a, t_a) + 7.5 \cdot (t - t_a), & \text{за } t_a < t \leq 2t_a, \end{cases} \quad (40)$$

відповідно, крива 1 рисунка 12.

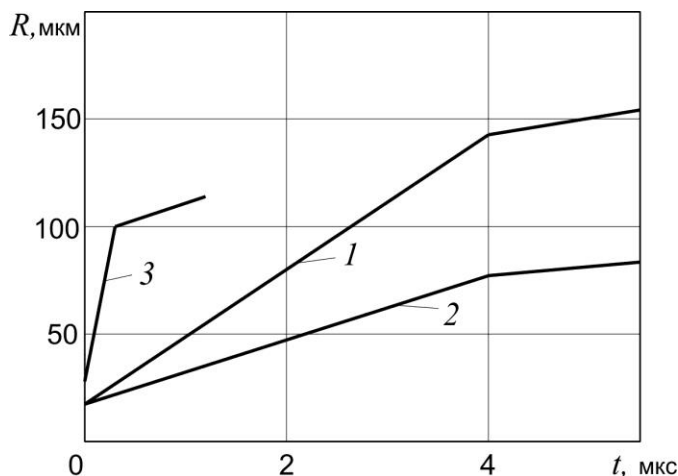


Рисунок 12 – Графіки зростання радіуса плазмового каналу розряду з плином часу:
1 – у деіонізованій воді [Spur G., Schonbeck J.], 2 – у водопровідній воді (розрахунок, рисунок 11), 3 – у водному розчині АмПАР (розрахунок, рисунок 14)

Значна частина електроерозійного обладнання на вітчизняних підприємствах експлуатується з використанням водопровідної води як робочого середовища. В дисертаційній роботі на основі результатів обчислень і експериментальних даних встановлено, що для середовища водопровідної води (питома електропровідність – 40 мкСм/см) застосовна формула зростання радіуса джерела тепла у вигляді:

$$R(t_a, t) = \begin{cases} 17.14 + 15t, & \text{за } 0 \leq t \leq t_a, \\ R(t_a, t_a) + 4 \cdot (t - t_a), & \text{за } t_a < t \leq 2t_a. \end{cases} \quad (41)$$

відповідно, крива 2 рисунка 12.

Суттєво розширює канал іскрового розряду за інших рівних умов застосування водних розчинів амфолітних поверхнево-активних речовин (АмПАР) як робочої рідини для ЕЕДВ. За рахунок інтенсифікації промивання МЕП, зміни умов охолодження та утворення адсорбційних плівок ПАР на поверхні електродів змінюються просторово-енергетичні характеристики каналу розряду, розподіл енерговиділення.

Проведено обчислювальні експерименти для встановлення параметрів розширення каналу іскрового розряду за умов його проходження в середовищі водних розчинів АмПАР. За осцилограмами сигналів напруги та струму, знятими протягом проходження одиничного іскрового розряду на режимах генератора МГКІ (таблиця 1), та параметрами форми електроерозійної лунки і зони переплавленого матеріалу, визначеними за мікроспліфом поперечного перетину лунки (рисунок 13), шляхом зіставлення з результатами розрахунків (рисунок 14), встановлено, що у випадку застосування водних розчинів АмПАР опис процесу розширення каналу розряду можна здійснити за формулою

$$R(t_a, t) = \begin{cases} 17 + 350t, & \text{за } 0 \leq t \leq t_a, \\ R(t_a, t_a) + 70 \cdot (t - t_a), & \text{за } t_a < t \leq 4t_a, \end{cases} \quad (42)$$

якій відповідає крива 3 на рисунку 12.

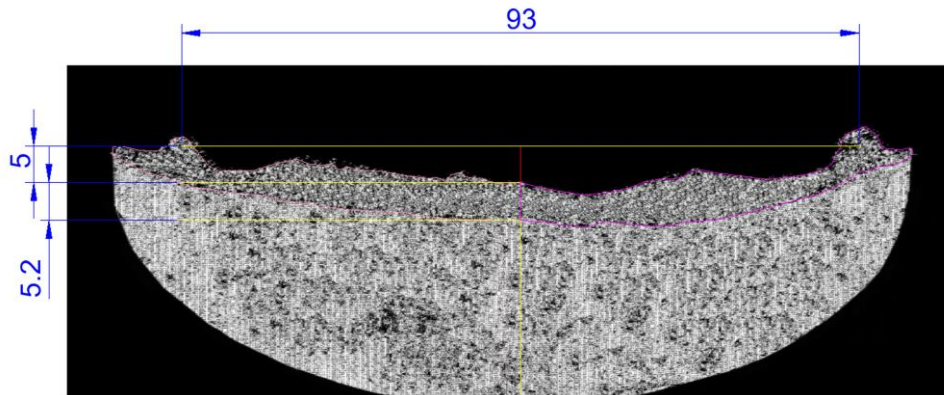


Рисунок 13 – Мікрошліф перетину ерозійної лунки (сталь 12X18H10, водний розчин АмПАР ($c = 0,05 \%$)): $V_{вип} = 2,21 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$, $V_{перепл} = 4,11 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$

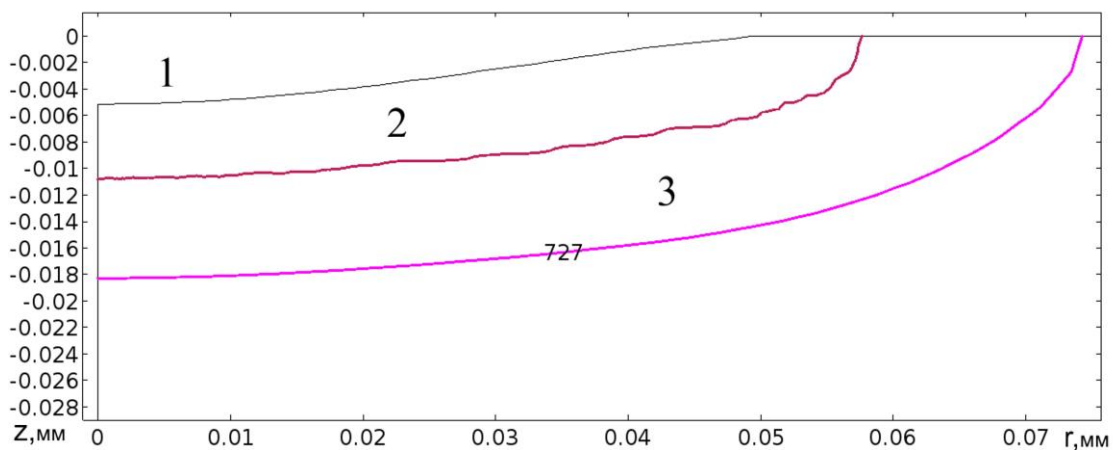


Рисунок 14 – Результати розрахунку ізофазних поверхонь та ізоTERM теплових полів ($R_k = 100 \text{ мкм}$, $E_a = 0,14 \cdot E_i$): 1 – випаруваний матеріал, 2 – зона переплавленого матеріалу, 3 – зона термічного впливу (сталь 12X18H10, водний розчин АмПАР ($c = 0,05 \%$))

Аналізуючи отримані графіки характеру розширення каналу розряду для різних робочих середовищ (рисунок 12), зроблено ряд важливих практичних висновків. Відомо, що чим більше радіус ерозійного кратера превалює над його глибиною, тим меншу шорсткість поверхні після ЕЕДВ буде отримано внаслідок багатократного накладання і перетину неглибоких лунок. З порівняння графіків видно, наскільки швидше розширення каналу розряду зумовлює середовище деіонізованої води, на відміну від середовища водопровідної води. Це, зокрема, пояснює застосування деіонізованої води як робочої рідини на дорогих зарубіжних електроерозійних вирізних верстатах, де якість поверхні обробленої деталі вища, ніж на дешевших, у тому числі вітчизняних, верстатах із застосуванням водопровідної води. Водночас у дисертаційній роботі встановлено суттєвий вплив на швидкість розширення каналу розряду добавок АмПАР у робочу рідину, застосування яких приводить навіть до посилення ефекту збільшення радіуса каналу, ніж в деіонізованій воді.

Шляхом обчислень за математичною моделлю теплових процесів руйнації матеріалу електродів та порівняння результатів з експериментальними даними встановлено ряд наукових засад, які є визначальними при виборі амплітудно-частотних характеристик режимів обробки та проектуванні джерел живлення для ЕЕДВ. Встановлено, що для діапазону параметрів одиничного іскрового розряду сучасних генераторів струму електроерозійних вирізних верстатів (таблиця 1) найбільший вплив на об'єми як випаруваної, так і рідкої фази матеріалу анода мають просторово-енергетичні характеристики каналу розряду, тобто площа дії плоского висококонцентрованого джерела тепла та загальна енергія, що виділилася на електроді (Ea). Водночас площа дії плоского джерела тепла є фактично домінуючою.

У дисертаційній роботі використано загальноприйняте припущення, що найімовірніше місце пробою іскрового розряду – на облямовувальному буртику попередньої лунки. За таких умов проведено моделювання процесів електроерозійного руйнування матеріалу і утворення термічно змінених приповерхневих шарів серією послідовних розрядів, результати якого зображено на рисунку 15.

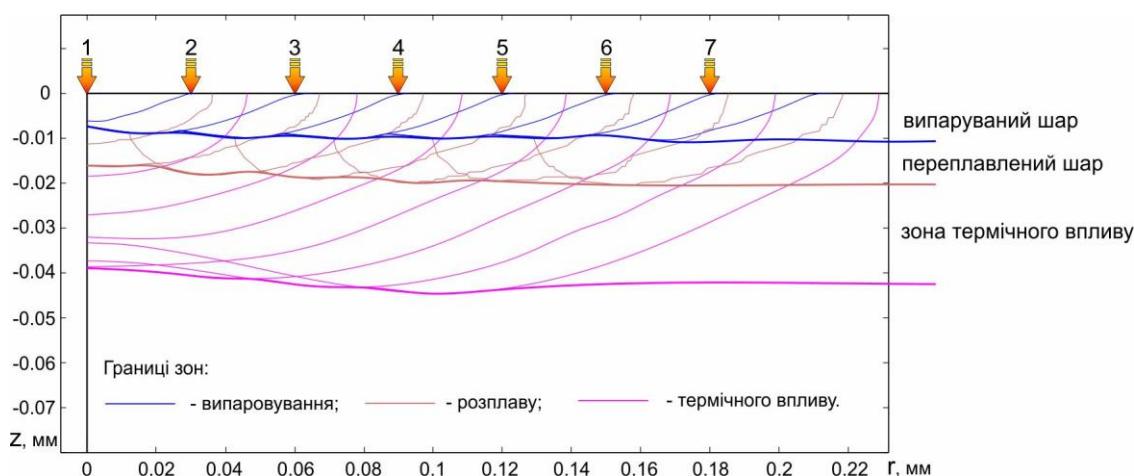


Рисунок 15 – Результати чисельного моделювання теплової дії серії послідовних розрядів (матеріал – Сталь 45, $t_i = 5,5$ мкс, $Rk = 58$ мкм, $Ea = 2,9$ мДж)



Рисунок 16 – Мікрошліф приповерхневих шарів (Сталь 45) після чорнового різку ЕЕДВ

Теоретичні розрахунки товщини переплавленого шару корелюють з характеристиками переплавленого шару на Сталі 45, експериментально отриманими за електроерозійного дротяного вирізання повного зйому на відповідному режимі генератора ГКІ 300-200А (рисунки 16).

Моделювання утворення «білого шару» та фазових перетворень виконано на основі отриманого розподілу теплових полів. Проведено чисельне моделювання дії серії послідовних іскрових розрядів з параметрами, що відповідають режиму 2-3 генератора ГКІ 300-200А. Матеріал анода – інструментальна

штампова сталь Х12Ф1. Встановлено (рисунок 17), що товщина переплавленого шару знаходиться в межах 10–12 мкм. Це збігається зі значеннями товщини «білого шару», визначеними за мікрошліфом (рисунок 18) в експериментальних дослідженнях приповерхневих шарів сталі Х12Ф1 на відповідному режимі обробки. При порівнянні теоретичних і експериментальних результатів слід зважати на нечітку верхню границю «білого шару», який складається з суцільної нижньої частини і пористої верхньої частини.

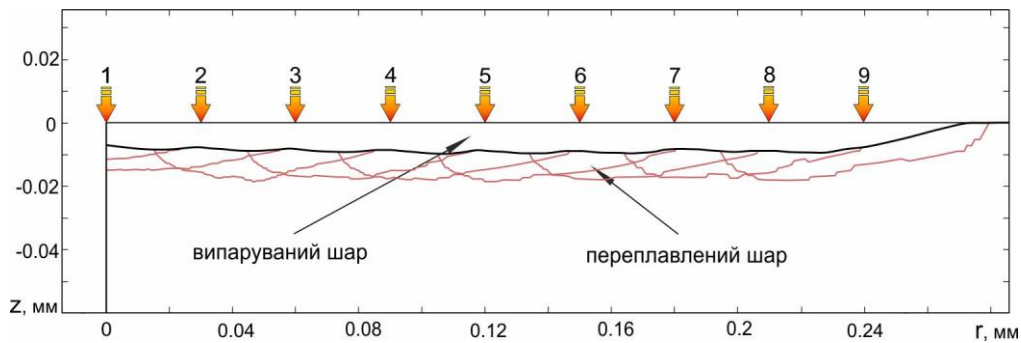


Рисунок 17 – Результати моделювання утворення переплавленого шару на поверхні сталі Х12Ф1 внаслідок дії серії послідовних розрядів на режимі 2-3 генератора ГКІ 300-200А

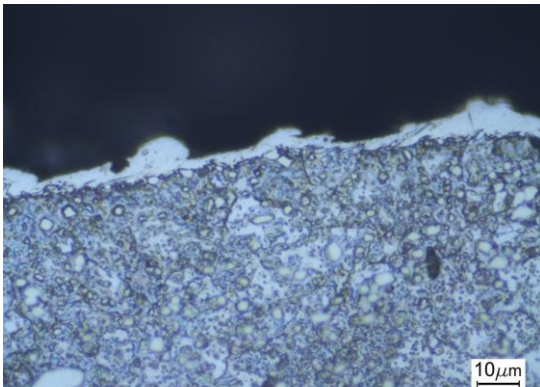


Рисунок 18 – Мікрошліф з «білим шаром» на інструментальній сталі Х12Ф1, утворений після чорнового різання ЕЕДВ

Аналогічно наведеному прикладу проводилися розрахунки параметрів поверхневих шарів на інших режимах ЕЕДВ згідно з таблицею 1. Результати внесені в поповнювану базу технологічних даних (розділ 6) і використовуються автоматизованою системою проектування технологічних процесів за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дрітним електродом.

У дисертаційній роботі запропоновано концепцію та методику прогнозування мікрогеометричних параметрів поверхонь, які формуватимуться шляхом взаємного перекриття лунок при електроерозійному дрітному вирізанні. Виходячи з ре-

зультатів чисельного моделювання утворення одиначної лунки для умов ЕЕДВ, представлено ряд рівнянь і порядок кількісного розрахунку параметрів R_z , R_p та R_a поверхні анода, отриманої внаслідок дії послідовності електричних розрядів. Для оцінювання рівня адекватності розробленої методики розрахунку проведено експериментальні дослідження динаміки зміни мікрогеометричних параметрів поверхні при багатопрхідному ЕЕДВ. Встановлено, що зі збільшенням кількості проходів показник шорсткості R_a знижується, значно зростає показник щільності піків R_{ps} , поверхня набуває платоподібного вигляду за показником R_{sk} , стаючи стійкішою до зношення. Розбіжність розрахованих параметрів шорсткості R_a і R_z за різних режимів ЕЕДВ з експериментально отриманими становить менше 20 %.

Четвертий розділ присвячено встановленню закономірностей процесів приповерхневого анодного розчинення при електрохімічній обробці мікросекундними імпульсами струму.

Проведено комплекс експериментальних та теоретичних досліджень впливу гідродинаміки потоку електроліту на процеси анодного розчинення з використанням електрохімічних комірок з осесиметричною та плоскопаралельною подачею електроліту. На основі результатів зазначених експериментів запропоновано підходи до узгодження гідравлічних режимів течії електроліту з амплітудно-часовими параметрами імпульсного джерела живлення.

З метою подальшого розвитку уявлення про механізми анодного розчинення сталей з різними гомогенними та гетерогенними структурами проведено серії експериментів по встановленню коефіцієнта виходу за струмом залежно від попередньої термообробки зразків сталей, результати яких зображено на рисунках 19–21.

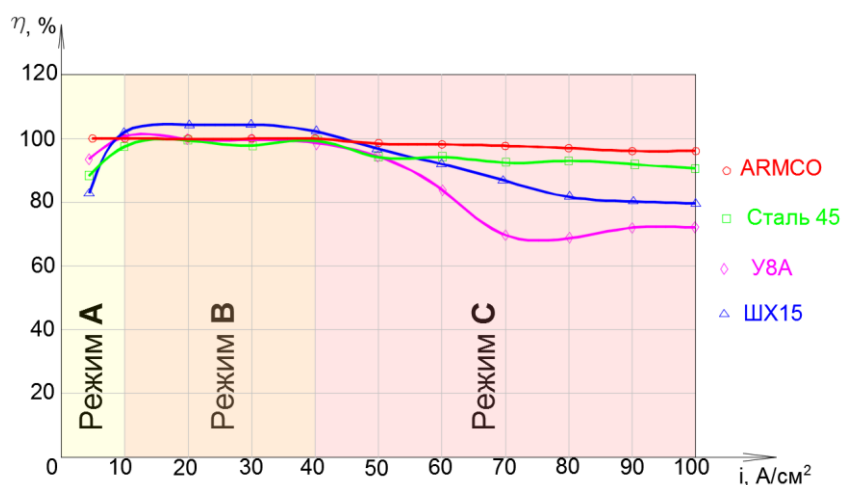


Рисунок 19 – Коефіцієнт виходу за струмом при анодному розчиненні сталей неповного відпалювання і ARMCO-заліза

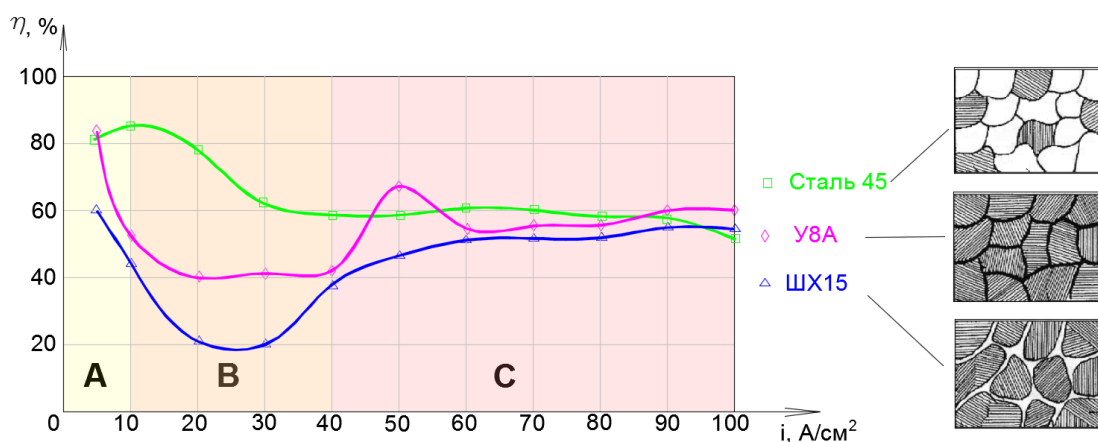


Рисунок 20 – Коефіцієнт виходу за струмом при анодному розчиненні повністю відпалених сталей

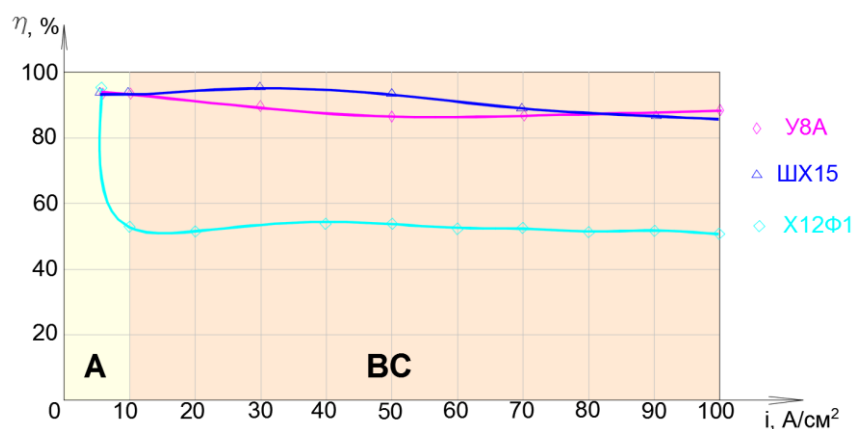


Рисунок 21 – Коефіцієнт виходу за струмом при анодному розчиненні загартованих сталей У8А, ШХ15 (мартенсит), загартованої (Ас1) сталі Х12Ф1 (решітчастий цементит і мартенсит)

Встановлено, що електрохімічному розчиненню сталей неповного відпалу та АRМСО-заліза, результати яких зображено на рисунку 19, притаманні наступні закономірності:

- АRМСО-залізо рівномірно розчиняється зі 100 % виходом за струмом на всьому досліджуваному діапазоні густин струму згідно з реакцією розчинення Fe_2^+ ;
- сталь ШХ15 на режимі В за густини струму 10–40 А/см² розчиняється з коефіцієнтом виходу за струмом, більшим 100 %; очевидно, процес розчинення супроводжується механічним видаленням електрохімічно інертних карбідів Fe_3C потоком електроліту;
- суттєвої залежності якості поверхні від швидкості руху електроліту не спостерігається;
- у вуглецевмісних сталях на режимі С за густини струму 60–100 А/см² здійснюється перехід на реакцію розчинення Fe_3^+ , спостерігаються відсутність значного газовиділення і наявність залишкової чорної плівки оксидів заліза.

Натомість розчинення сталей повного відпалу (рисунок 20) з гетерогенною структурою відбувається проблемно й нестабільно, при цьому виявляється суттєва залежність від швидкості руху електроліту за критичної тривалості імпульсів за формулою (38): $i_{\text{lim}} \approx i_{\text{PL}}$.

Сталь 45 (рисунок 20) за густини струму 20 А/см² показує відносно високий коефіцієнт виходу за струмом, але спостерігається смугасте розчинення. Характер смуг уздовж потоку на поверхні зразка збігається з характером розподілу швидкостей електроліту (рисунок 22, а, б). Більш рівномірне розчинення вдалося отримати на режимі з густиною струму 70 А/см², скоротивши тривалість імпульсів до значень, значно менших критичних (рисунок 22, в).

Сталі У8А та ШХ15 на режимі В (густина струму – 10–40 А/см²) показують найнижчий коефіцієнт виходу за струмом (рисунок 20). Спостерігається гребінчаста поверхня після розчинення, гребінці розташовані поперек потоку електроліту. Встановити механізми розчинення в цьому випадку вдалося завдяки порівнянню отриманих результатів з даними провідних зарубіжних дослідників. Зерна цементиту є електропровідними, але електрохімічно інертними. Це зумовлює місцевий мікроперерозподіл густини струму

і викликає інтенсивне розчинення фериту з підвищеною густиною струму, що призводить до невиконання умови $i_{\max}=i_{PL}$ і настає дифузійне обмеження процесів розчинення металу. Активізуються побічні реакції, інтенсивне виділення кисню змінює місцевий рН-фактор, утворюються оксидні плівки. Зерна цементиту, які з часом підносяться над поверхнею, формують когерентні структури на поверхні анода, викликають утворення і розвиток вихорів у потоці електроліту, через це порушується рівномірність товщини дифузійного шару і відбувається вибіркове посилення інтенсивності розчинення.

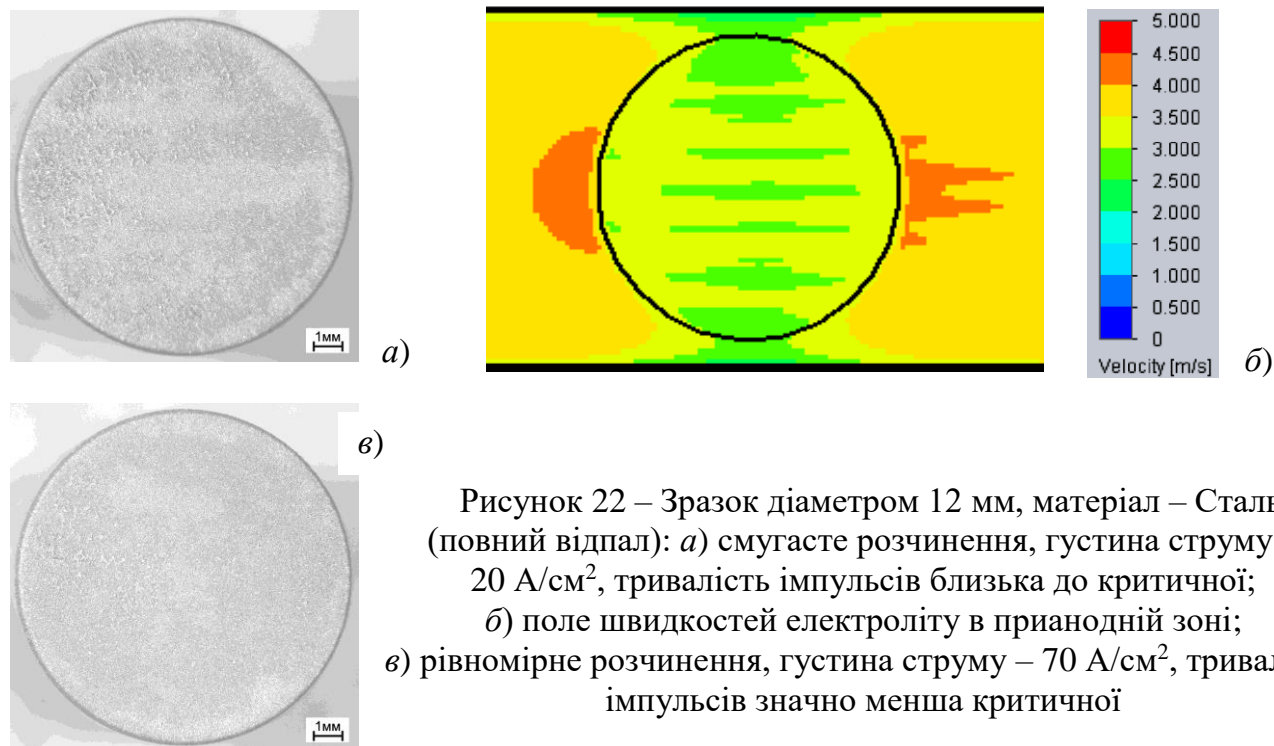


Рисунок 22 – Зразок діаметром 12 мм, матеріал – Сталь 45 (повний відпал): а) смугасте розчинення, густина струму – 20 А/см², тривалість імпульсів близька до критичної; б) поле швидкостей електроліту в прианодній зоні; в) рівномірне розчинення, густина струму – 70 А/см², тривалість імпульсів значно менша критичної

Найкращі результати і за коефіцієнтом виходу за струмом, і за якістю отриманої поверхні показали загартовані сталі (рисунок 21). Встановлено наступні характеристики процесу електрохімічного розчинення:

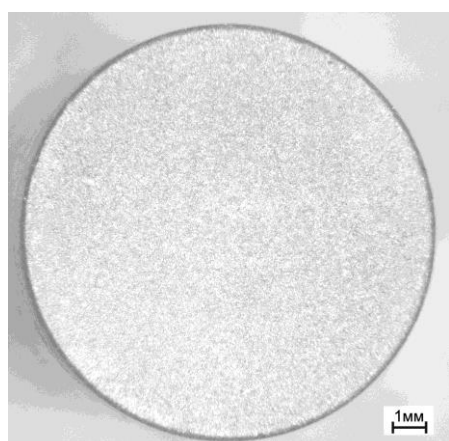


Рисунок 23 – Зразок діаметром 12 мм, матеріал – У8А (загартований), після електрохімічної обробки за густини струму – 50 А/см²

- відбувається рівномірне розчинення гомогенної структури мартенситної фази (сталі У8А, ШХ15) з високим стабільним коефіцієнтом виходу за струмом;

- відбувається розчинення двовалентного заліза, вивільнені атоми вуглецю видаляються потоком електроліту без витрат електрики, отримується якісна поверхня (рисунок 23);

- режим гартування сталі Х12Ф1 з отриманням структури мартенситу з решітчастим цементитом призводить до значного зменшення виходу за струмом, інтенсивного виділення О₂ і погіршення стану поверхні.

Для використання встановлених закономірностей у проектуванні технологічних процесів за комбінованою технологією розроблено наукові засади з урахуванням особливостей протікання процесів ЕХРО ДЕ.

На основі комплексу експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано та обґрунтовано використання ексцесу (E_s) розподілу густини струму як критерію для оцінювання локалізації процесу анодного розчинення при використанні технологій ЕХРО ДЕ. Точний аналітичний опис розподілу густини струму на поверхні анода здійснюється за допомогою математичної моделі (10)–(19), зони активності розчинення I–III (рисунок 24) відповідають режимам А–С (рисунки 19–21). Їх комплексне використання забезпечує принципову можливість кількісного опису та надає змогу виокремити вплив на локальність процесу розчинення власне конфігурації напруженості електричного поля в електрохімічній комірці з циліндричним електродом, яка, в свою чергу, обумовлена величиною МЕР і діаметром дроту. Відповідно, отримуємо можливість адекватно оцінити внесок параметрів електроліту та амплітудно-часових параметрів джерела живлення (АЧПДЖ) у рівень локалізації процесу розчинення.

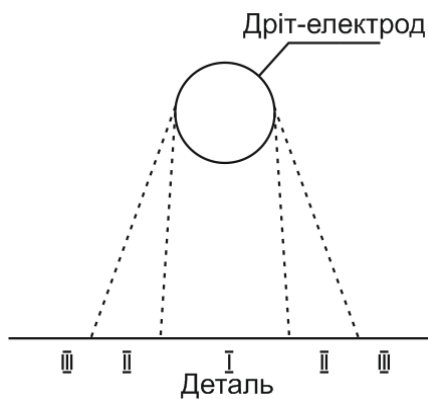


Рисунок 24 – Принципова схема оцінювання рівня локалізації процесу анодного розчинення

За результатами проведеного комплексу обчислювальних та натурних експериментів отримано поля швидкостей потоку електроліту в МЕР по всій висоті деталі залежно від параметрів сформованого сопла струменя, гідродинамічних умов його входження в МЕР. Для практичного проектування технологічних процесів ЕХРО ДЕ отримано кількісні залежності швидкості електроліту в прианодній зоні від величини надлишкового тиску на вході в сопло та встановлено умови, які забезпечують рівномірність її розподілу.

Запропоновано методику узгодження гідралічних режимів течії електроліту з амплітудно-часовими параметрами імпульсного джерела живлення для зменшення нерівномірності розчинення по висоті деталі та підвищення точності формоутворення шляхом зіставлення отриманих розподілу швидкостей потоку електроліту та розподілу струму на поверхні анода (рисунок 25). Її використання дає можливість для кожного конкретного випадку (висоти деталі, величини МЕР, параметрів подачі робочої рідини) виявити зони з нестабільним потоком електроліту і, зважаючи на дифузійні обмеження процесів анодного розчинення (за моделлю (33)–(38)), проектувати амплітудно-часові параметри імпульсів струму, які забезпечують рівномірність та стабільність розчинення по всій висоті обробки.

Встановлено закономірності впливу величини МЕР на технологічний процес ЕХРО ДЕ згідно з запропонованим критерієм локалізації в комплексі з дією інших чинників багатопараметричного процесу анодного розчинення.

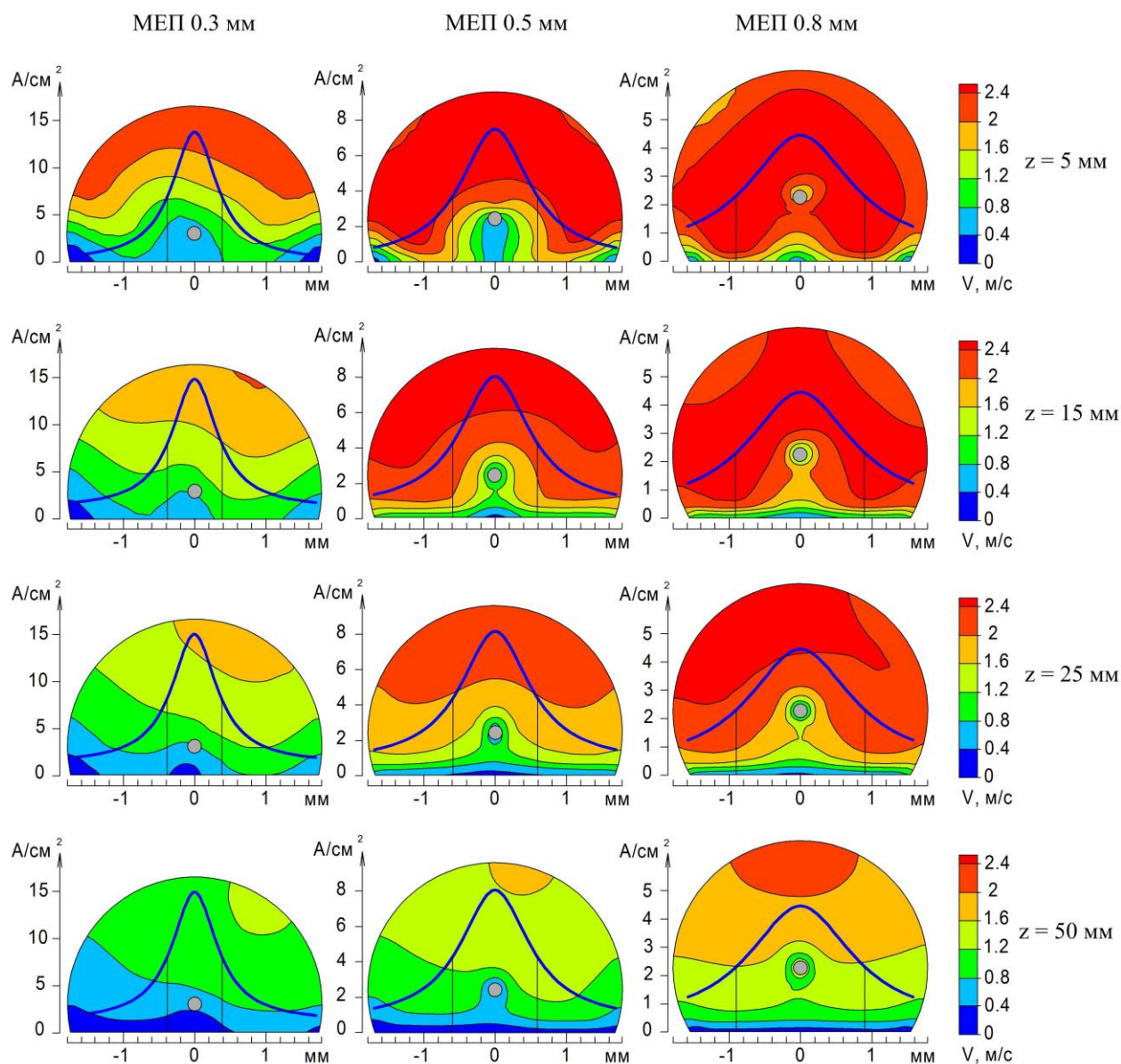
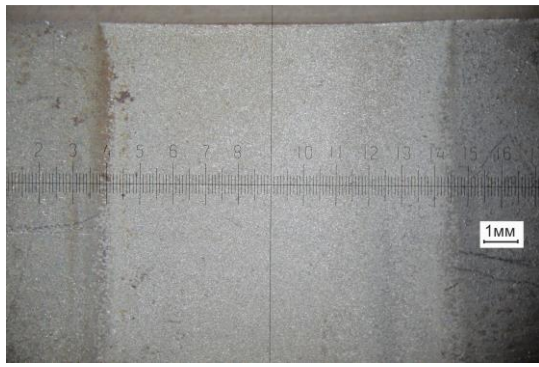
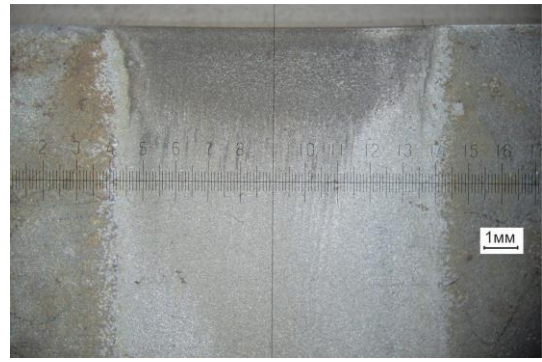


Рисунок 25 – Суміщення поля швидкостей потоку електроліту в поперечному перерізі струменю та розподілу густини струму по поверхні анода

Експериментальна перевірка підтвердила ефективність практичного використання отриманих результатів досліджень та їх сприяння підвищенню стабільності та прогнозованості електрохімічної розмірної обробки дрітним електродом як технології. Так, при виборі параметрів імпульсного струму, розрахованих відповідно до швидкості електроліту згідно з запропонованою методикою, отримуємо рівномірно розчинений шар з низькою шорсткістю сформованої поверхні (рисунок 26, а). При відхиленні від розрахованих параметрів у бік збільшення підведеної енергії спостерігається порушення нормального процесу розчинення у верхній частині анода, в зоні нестабільності потоку електроліту. Очевидно, надлишкова енергія викликає супутні небажані хімічні реакції, спостерігається смугасте розчинення (рисунок 26, б).



а)



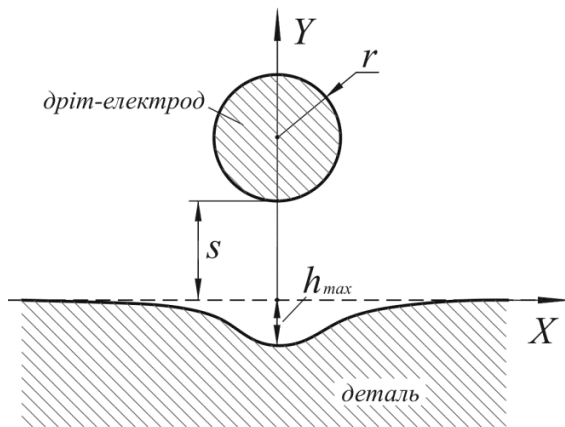
б)

Рисунок 26 – Фотографія ділянки на поверхні анода після ЕХРО ДЕ:

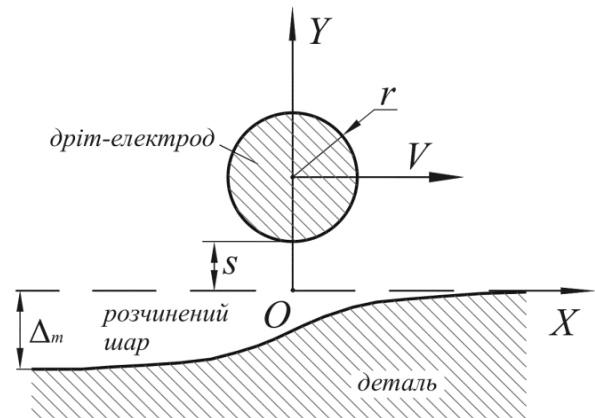
а) при розрахованих параметрах імпульсів струму;

б) при відхиленні від розрахованих значень параметрів імпульсів струму

Проведено експериментальні дослідження ефективності анодного розчинення по виходу за струмом у технологічних схемах з нерухомим та рухомих дрітним катодом (рисунок 27).



а)



б)

Рисунок 27 – Схема анодного розчинення поверхні з нерухомим (а) та з рухомих (б) катодом

У таблиці 2 наведено амплітудно-часові параметри імпульсів струму, розраховані значення допустимої густини струму i_{PL} та значення коефіцієнта виходу за струмом η для експериментів з нерухомим катодом. Результати розрахунків свідчать, що при відхиленні величини максимальної густини струму i_{max} , реалізованої в експерименті, від розрахованої i_{PL} коефіцієнт виходу за струмом падає.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта виходу за струмом в експериментах з нерухомим катодом

Код експерименту	$i_{max}, A/cm^2$	t_1, ms	T, ms	$i_{PL}, A/cm^2$	η
6K1	5,6	2	8	6,95	0,96
6K2	14,97	2	8	6,95	0,64
6K3	31,08	2	8	6,95	0,48
6K4	30,91	2	4	6,04	0,38
6K5	28,9	1	2	8,54	0,43

Аналогічні результати експериментів з рухомих дотяним електродом наведено в таблиці 3. В експерименті 1П9 значення i_{\max} близьке до розрахованої величини i_{PL} і отримано високу ефективність ЕХРО з коефіцієнтом виходу за струмом 0,9, а в експерименті 4П6 (1) так вибрані технологічні параметри, що i_{\max} майже втричі перевищує допустиме значення i_{PL} , і маємо низьку ефективність процесу з коефіцієнтом виходу за струмом 0,15.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнта виходу за струмом в експериментах з рухомих катодом

Код експерименту	i_{\max} , А/см ²	t_1 , мс	T , мс	i_{PL} , А/см ²	η
1П9	4,59	5	10	4,68	0,90
4П6(1)	35,0	2	10	11,7	0,15

Вперше проведено експериментально-теоретичні дослідження зміни коефіцієнта електрохімічного розчинення по глибині електроерозійно сформованих поверхневих шарів (рисунок 28).

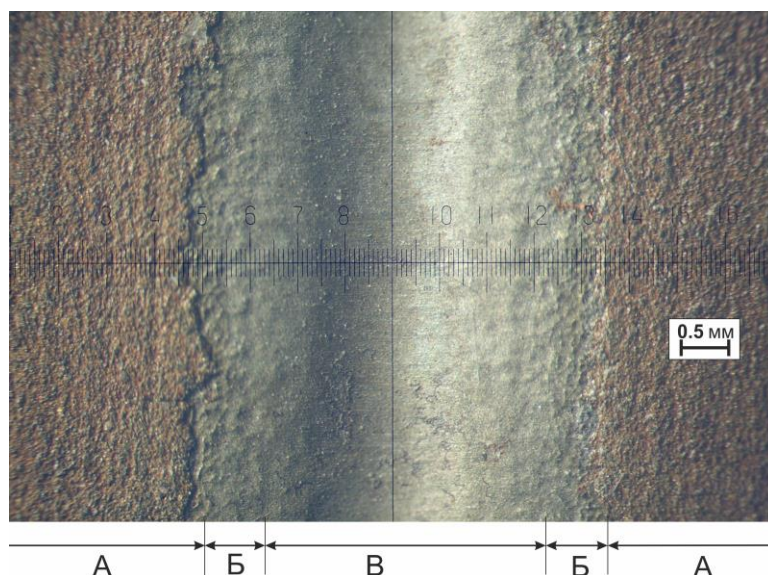


Рисунок 28 – Фотографія канавки на поверхні електроерозійно обробленої деталі, отримана при подальшому електрохімічному розчиненні нерухомим дотяним електродом: зони А – нерозчинений поверхневий шар, зони Б – напіврозчинений шар, зона В – розчинений матеріал основи

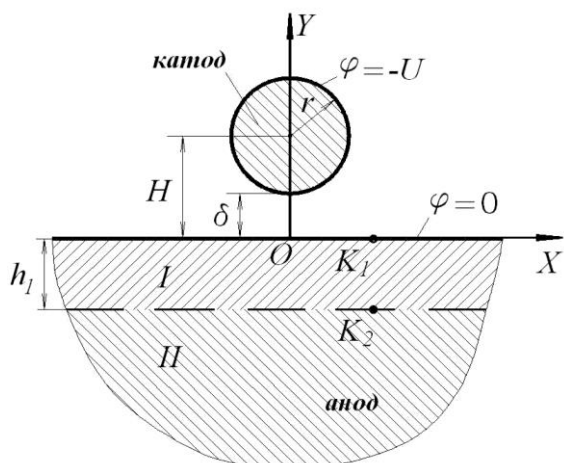


Рисунок 29 – Розрахункова схема двохсфорової поверхні анода при електрохімічній обробці дотяним катодом

Запропоновано брати до розгляду змінний коефіцієнт електрохімічного розчинення матеріалу, який змінюється з глибиною (рисунок 29):

$$K_v = \begin{cases} K_1 + (K_2 - K_1) \cdot \frac{\xi}{h_1}, & \text{при } 0 \leq \xi \leq h_1; \\ K_2, & \text{при } |\xi| \geq h_1. \end{cases} \quad (43)$$

Тоді глибина розчиненого матеріалу анода в кожній точці з координатою x визначається:

$$h(x,t) = K_v \cdot j(x) \Big|_{y=0} \cdot t = \frac{2 \cdot K_v \cdot \kappa \cdot U \cdot a}{\ln p} \cdot \frac{1}{x^2 + a^2} \cdot t, \quad (44)$$

де $j(x)$ – густина технологічного струму; t – час розчинення; κ – питома провідність електроліту.

Серії експериментів по утворенню канавок на електроерозійно сформованих поверхнях і зіставлення їх з теоретичними розрахунками (рисунок 30) дали можливість встановити значення коефіцієнтів K_1 та K_2 у формулі (43) для різних сталей і режимів ЕЕДВ.

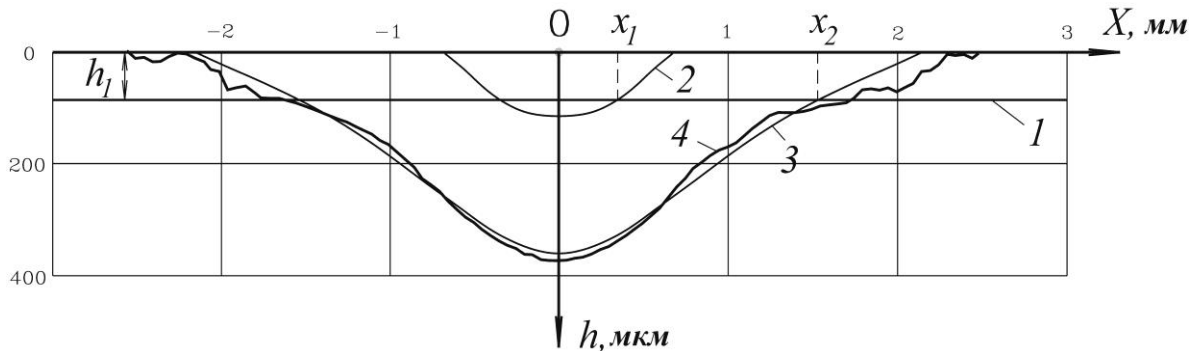


Рисунок 30 – Форма канавки на поверхні анода при електрохімічному розчиненні: 1 – границя областей I та II з різними електрохімічними еквівалентами, 2 – профіль канавки на поточний момент t часу розчинення, 3, 4 – розрахунковий та експериментально отриманий, відповідно, профілі канавки на кінцевий момент t_2 часу розчинення

Запропонована методика розрахунку кількісних параметрів процесу анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів забезпечує суттєве підвищення адекватності розрахунків параметрів процесів електрохімічної модифікації поверхонь дротяним електродом.

П'ятий розділ спрямовано на створення наукових засад для забезпечення точності формоутворення елементів складноконтурних поверхонь за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

Встановлено, що за ЕЕДВ визначальним є поперечне силове навантаження, викликане іскровими розрядами, яке зумовлює деформування дроту-електрода з обмеженою жорсткістю. Відхилення дроту від прямолінійного вертикального положення призводить до спотворення траєкторії різку та форми поверхні, що утворюється.

В результаті проведених експериментально-теоретичних досліджень встановлено залежності поперечного навантаження на дротяний електрод від швидкості різання інструментальних сталей та твердих сплавів (рисунок 31).

Отримано дані для досліджуваних сталей і твердих сплавів у межах похибки, що не перевищує 6 %, апроксимовані лінійною функцією (рисунок 31, пряма 1):

$$q = k \cdot V + q_0, \quad (45)$$

причому, для сталей: $q_{st} = 0.953 \cdot V + 0.025$, для твердих сплавів: $q_{tc} = 1.94 \cdot V + 0.04$.

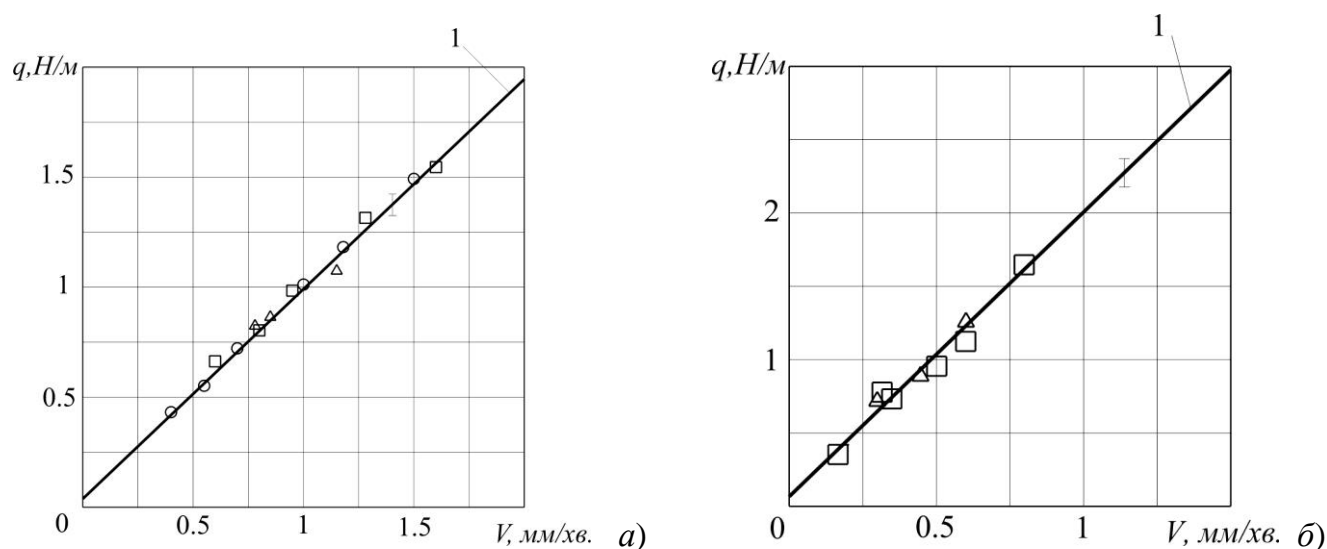


Рисунок 31 – Залежність розподіленого навантаження на дротяний електрод діаметром 0,2 мм від швидкості різання: а) сталей (\circ – Сталь 45, \square – У8, Δ – 15ХМ); б) твердих сплавів (\square – ВК8, Δ – ВК20)

Ці співвідношення є ключовими у визначенні реальної форми дротяного електрода за ЕЕДВ з використанням математичної моделі (1).

Після виконання вирізної електроерозійної операції деталь залишається закріпленою на призмах верстата зі збереженням координат позиціонування. Далі виконується електрохімічна обробка.

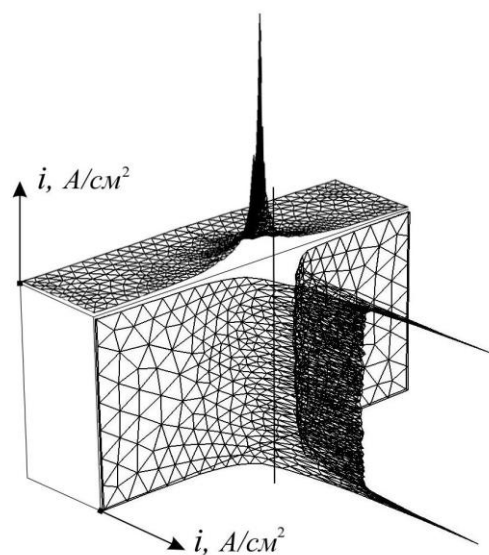


Рисунок 32 – Сіткові графіки розподілу густини струму на передній та верхній гранях анода

Шляхом математичного моделювання (моделі (20)–(25)) вперше встановлено й експериментально підтверджено закономірності розподілу густини струму на гранях анода для конфігурації плоский анод – циліндричний катод. На передній та верхній гранях анода (на нижній грані – симетрично) спостерігається суттєве збільшення рівня концентрації густини струму в локальних областях на ребрах анода (рисунок 32). Проведені обчислювальні експерименти показали, що варіація значень діаметра ДЕ, величини МЕР, висоти анода не змінює зазначеної вище тенденції.

Для підвищення точності формоутворення за ЕХРО ДЕ і рівномірності анодного розчинення по всій висоті деталі розроблено і запропоновано для практичного використання технологію застосування змінної активної довжини катода.

Застосовується ізолятор на дротяному катоді, який розміщується на висоті h над поверхнею катода, так що мінімізується збурення електростатичного поля, поблизу верхньої та нижньої граней деталі (рисунок 33, а). Вибір висоти h базується на розра-

хунках розподілу густини струму (рисунк 33, б) на передній грані деталі за математичною тривимірною моделлю розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод (20)–(25).

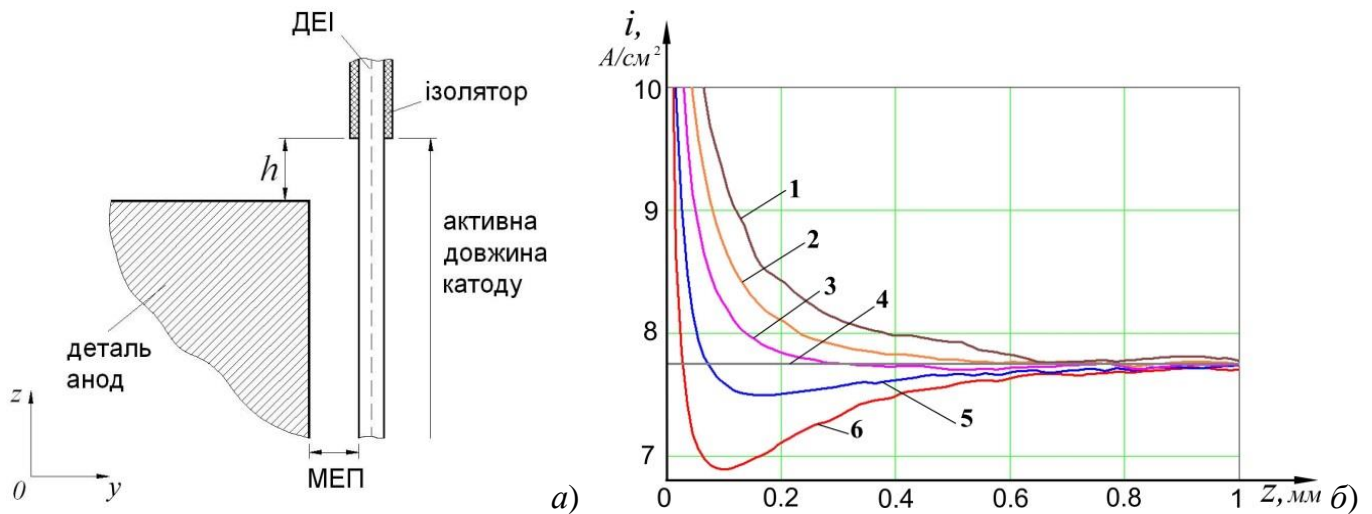


Рисунок 33 – Застосування ізолятора за ЕХРО ДЕ: а) схема розміщення ізолятора катода; б) розподіл густини струму на передній грані деталі вздовж осі OZ при різних положеннях ізолятора: 1 – без ізолятора; 2 – $h = 0,5$ мм; 3 – $h = 0,25$ мм; 5 – $h = 0,1$ мм; 6 – $h = 0$; 4 – значення густини струму далеко від ребер деталі

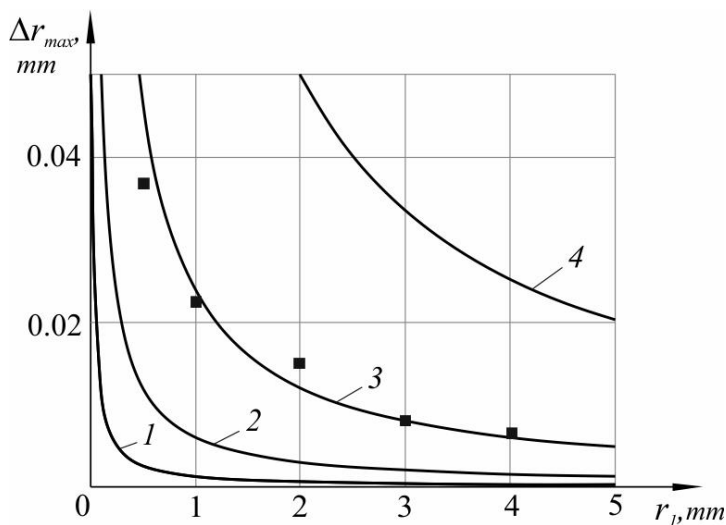


Рисунок 34 – Залежність максимальної похибки формоутворення циліндричної поверхні Δr_{max} від радіуса дуги програмної траєкторії r_p за різної товщини заготовки: 1 – 40 мм, 2 – 68 мм, 3 – 100 мм, 4 – 150 мм, ■ – експериментально визначені значення похибок

Використовуючи методику визначення реальної форми ДЕ за ЕЕДВ і спираючись на розроблені математичні моделі базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом, створено методологію проектування технологічних процесів формування елементів складноконтурних поверхонь з заданою точністю на основі комп'ютерного моделювання формоутворення поверхні.

Проведено експериментальну верифікацію результатів моделювання формоутворення поверхні при русі дроту по дуговій траєкторії на основних режимах ЕЕДВ (рисунк 34).

Комп'ютерне моделювання процесу усунення похибки електроерозійного формоутворення циліндричної поверхні при подальшій ЕХРО виконується за

кількісними розрахунками електрохімічного розчинення на основі математичної моделі для технологічної схеми циліндричний рухомий катод – циліндричний анод.

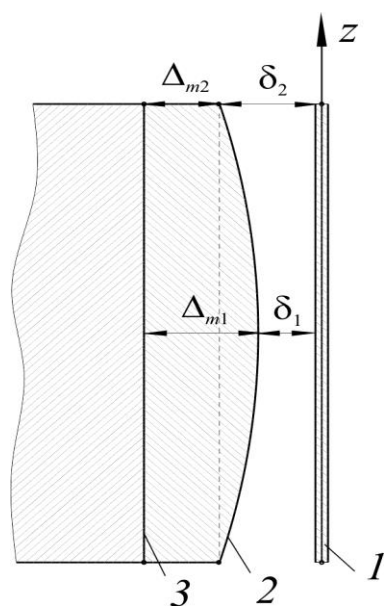


Рисунок 35 – Вирівнювання поверхні за допомогою EXPO ДЕ після ЕЕДВ:
1 – дротяний електрод;
2 – викривлений профіль поверхні деталі;
3 – вирівняна твірна поверхні деталі

На стадії EXPO дротяний електрод має прямолінійну форму завдяки відсутності поперечного силового навантаження (рисунок 35). Вирівнювання поверхні вздовж вертикальної твірної відбувається за рахунок більшої швидкості анодного розчинення посередині випуклої поверхні, де МЕП менший і, відповідно, напруженість електричного поля більша.

В *шостому розділі* проведено структурузацію та систематизацію результатів досліджень, створено основу для проектування ефективних технологічних процесів обробки з заданими та контрольованими параметрами деталей.

Систематизовано задачі проектування технологічного процесу на стадії електроерозійного вирізання та стадії електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом. Науковим базовим підґрунтям для вирішення кожної сформульованої задачі слугують відповідні математичні моделі та методики, розроблені в дисертаційній роботі.

Взаємодію основних блоків інтегрованої САПР ТП розглянуто на прикладі проектування технологічного процесу виготовлення прецизійних деталей магнітної оптики, що пройшов успішну апробацію.

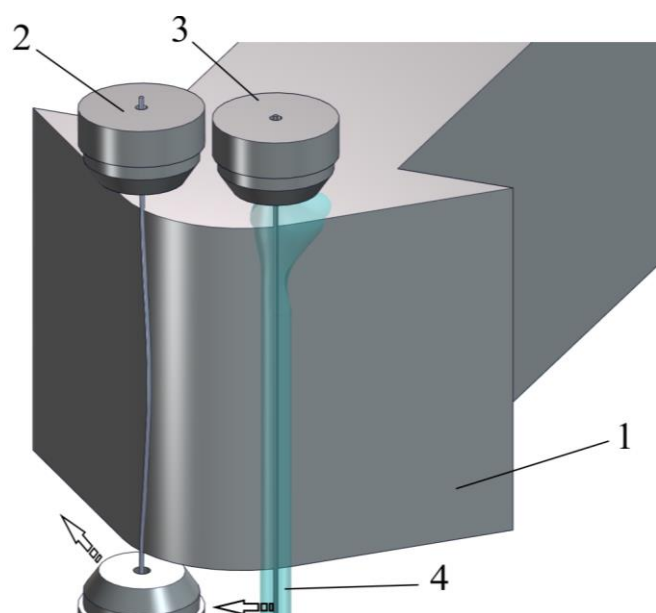


Рисунок 36 – Схема послідовної електроерозійної електрохімічної обробки дротяним електродом (масштаб не витриманий): 1 – гіперболічна поверхня полюса квадрупольної лінзи;
2 – перший прохід ЕЕДВ; 3 – другий прохід EXPO ДЕ; 4 – струмінь електроліту

Для виготовлення полюсів квадрупольної лінзи іонного мікроскопа (ядерного мікрозонда) було застосовано комбіновану технологію електроерозійної вирізної обробки й електрохімічної розмірної обробки тим же дротяним електродом на верстаті за одну установку. Робоча частина полюсів являла собою лінійчасту поверхню висотою 43 мм, в профілі гіпербола (рисунок 36). Матеріал деталі – технічно чисте залізо (ARMCO). Чотири полюси повинні створювати симетричне магнітне поле, яке стискає високоенергетичний потік іонів.

З дослідницькою метою проводилась реєстрація стану поверхні на основних стадіях процесу виготовлення деталей. У таблиці 4 подано значення основних параметрів мікрогеометрії поверхні після ЕЕДВ та EXPO ДЕ.

Таблиця 4 – Зміна параметрів мікрогеометрії поверхні в процесі обробки

Стадії процесу	шорсткість, Ra , мкм	асиметричність, Rsk	щільність піків, Rpc , pks/cm
прохід ЕЕДВ	2,72	0,17	195,8
прохід ЕХРО ДЕ	0,64	-1,26	41,7

На поверхні ARMCO заліза після ЕЕДВ відсутній переплавлений білий шар, характерний для інших вуглецевмісних сплавів заліза. Однак зона термічного впливу товщиною 10–15 мкм помітна на мікрошліфах поперечного перерізу поверхні (рисунок 37, а).

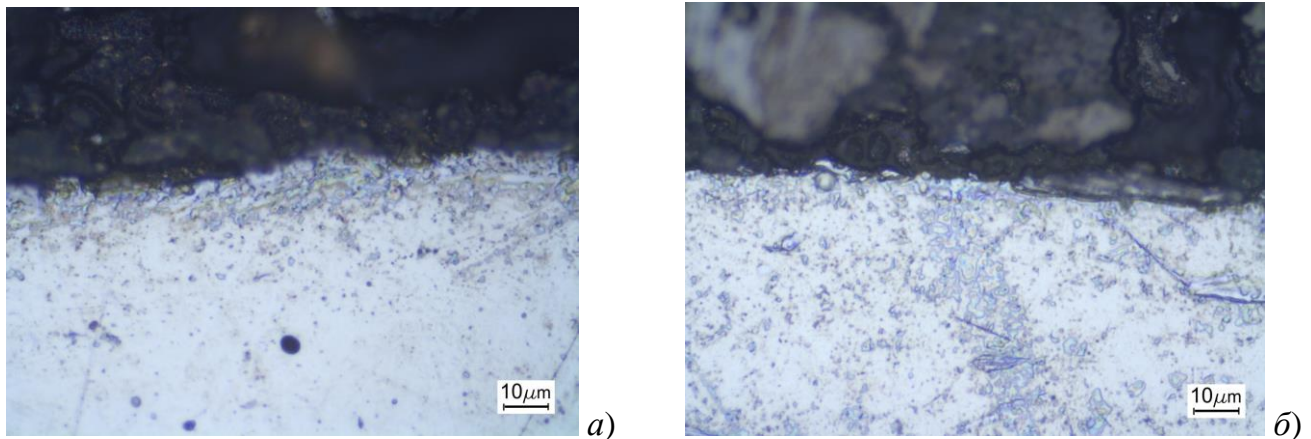


Рисунок 37 – Мікрошліфи поверхні ARMCO заліза:
а) після ЕЕДВ, б) з наступною ЕХРО ДЕ

В результаті подальшої технологічної операції ЕХРО ДЕ зона термічного впливу знімається анодним розчиненням матеріалу (рисунок 37, б).

Вимірювання форми поверхні, проведені за допомогою координатно-вимірювальної машини, показали, що відхилення гіперболічного профілю від заданого по всій поверхні полюса не перевищує 7 мкм.

Проведений натурний експеримент з повним виробом в зборі підтвердив необхідну високу рівномірність магнітного поля для фокусування потоку заряджених частинок. Випробування показали стійку роботу виробу з можливістю керування іонним пучком із субмікронною роздільною здатністю.

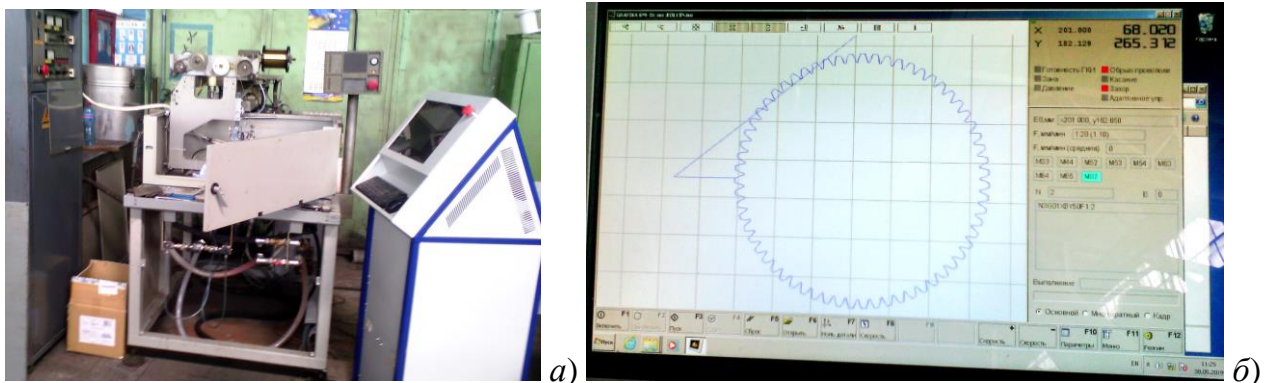


Рисунок 38 – Загальний вигляд верстата для комбінованої обробки (а)
з новою сучасною системою ЧПК (б)

Створені в дисертаційній роботі базові наукові засади реалізовані в апаратній і програмній частинах новітнього електроерозійного обладнання (рисунок 38) і сприяють його широкому впровадженню на підприємствах, що підтверджено відповідними актами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сукупність представлених у дисертації результатів експериментальних та теоретичних досліджень процесів комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки, отриманих нових наукових положень і технічних рішень становить нове вирішення важливої науково-технічної проблеми створення науково-технологічних засад розвитку перспективної комбінованої технології обробки матеріалів дротяним електродом і робить вагомий внесок у розвиток електрофізичних та електрохімічних методів обробки. Найбільш істотні наукові результати і висновки дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Вперше створено комплекс математичних моделей з використанням аналітичних, CFD та CAE методів для досліджень і розрахунків параметрів базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом. На цій підставі отримали розвиток теоретичні основи процесів взаємодії іскрового розряду з залізовуглецевими сплавами в рамках теплової теорії руйнації матеріалу, розвинуті уявлення про прианодні процеси молекулярної дифузії за електрохімічного розчинення в активуючих та пасивуючих електролітах.

2. Створені наукові засади для визначення технологічних режимів, які дозволяють одержати ефективні характеристики процесів комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом, шляхом отримання можливості керованого формування поверхонь з новими заданими геометричними і фізико-хімічними параметрами на підставі створення експериментально-розрахункової системи багатofакторного врахування параметрів обладнання і технологій.

3. Вперше запропоновано експериментально-розрахункову методологію, що ґрунтується на адаптивному узгодженні результатів точних експериментальних досліджень з даними обчислювального експерименту з варійованими вхідними параметрами та є ефективним інструментом наукових досліджень теплових процесів руйнації матеріалу електрода і дає змогу достатньо адекватно оцінювати параметри джерела тепла, сформованого одиничним іскровим розрядом.

4. Внаслідок проведених серій обчислювальних експериментів з використанням тривимірної моделі теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності встановлено, що для обраного діапазону параметрів одиничного іскрового розряду сучасних генераторів струму електроерозійних вирізних верстатів найбільший вплив на об'єми як випаруваної, так і рідкої фази матеріалу анода (Сталь 45) мають просторово-енергетичні характеристики каналу розряду, а саме площа дії плоского висококонцентрованого джерела тепла та загальна енергія, що виділилася на електроді (E_a). Водночас фактично домінує площа дії плоского джерела тепла.

5. Запропоновано та обґрунтовано методику визначення параметрів шорсткості поверхонь, сформованих послідовністю дії розрядів, характерних для електроерозійного дротяного вирізання. Розрахунки параметрів шорсткості сталевих деталей за отри-

маними рівняннями та розрахованими геометричними характеристиками одиної ерозійної лунки (V_l , d_l , h_l) дають задовільний збіг з експериментально отриманими профілограмами.

6. На основі комплексу експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано й обґрунтовано використання в якості критеріїв оцінки локалізації процесу анодного розчинення при реалізації технологій ЕХРО ДЕ величини зони розчинення та ексцесів (Es) розподілу густини струму й активності розчинення по поверхні анода. Це забезпечує принципову можливість кількісного опису та надає змогу виокремити вплив на локальність процесу розчинення власне конфігурації напруженості електричного поля в електрохімічній комірці з циліндричним електродом, яка, в свою чергу, обумовлена величиною МЕР і діаметром дроту. Відповідно, отримано можливість адекватної оцінки внеску параметрів електролізу та АЧПДЖ у рівень локалізації процесу розчинення.

7. Встановлено, що розроблена математична модель дифузії в прианодних шарах дає можливість розрахувати технологічні параметри, які забезпечать максимальну ефективність ЕХРО по виходу за струмом. Проведені зіставлення результатів експериментів для імпульсів тривалістю 2 – 10 мс з дотриманням теоретичних рекомендацій і з відхиленням від них доводять, що створена методика дає можливість виконати обґрунтований вибір амплітудно-часових параметрів джерела живлення при проектуванні технологічних процесів електрохімічної обробки дротяним електродом. Запропонований підхід з використанням математичного моделювання дає можливість у перспективі перейти до застосування більш складних форм імпульсів технологічного струму, що надасть додаткові важелі в керуванні процесами в МЕР для покращення якості вихідної поверхні внаслідок анодного розчинення дротяним електродом.

8. Спираючись на методи обчислювальної гідродинаміки, розроблено математичну модель руху електролізу в МЕР для технологічної схеми плоский анод – циліндричний катод при коаксіальній подачі струменя електролізу за допомогою сопла. Підтверджено адекватність моделі шляхом зіставлення результатів з відомими аналітичними розв'язками рівнянь Прандтля для пограничного шару при поздовжньому обтіканні тонкої пластинки набігаючим потоком з малими та великими числами Рейнольдса. Обґрунтовано межі застосування моделі для фазового складу потоку, його швидкості та величини МЕР. Запропоновано конструкцію сопла, яке забезпечує необхідні гідродинамічні характеристики подачі струменя робочої рідини в зону обробки при послідовних технологіях ЕЕДВ та ЕХРО ДЕ.

9. За результатами проведеного комплексу обчислювальних експериментів отримано поля швидкостей потоку електролізу в МЕР залежно від гідродинамічних умов подачі та величини МЕР. Виявлено ділянки на аноді з критично малою чи суттєво нерівномірною швидкістю потоку електролізу. Через низьку швидкість оновлення електролізу ці ділянки обмежують максимальне значення підведеної електричної енергії. Враховуючи це та спираючись на результати моделювання, запропоновано практичні рекомендації по вибору умов подачі електролізу, які дають змогу отримати максимально можливі швидкість та рівномірність потоку.

10. Запропоновано вдосконалену методику розрахунку кількісних параметрів процесу анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають нерівномірні по товщині електрохімічні характеристики, яка дає можливість

уточнити чисельні значення коефіцієнтів електрохімічного розчинення поверхневих шарів сталі та може забезпечити суттєве підвищення точності розрахунків параметрів процесів електрохімічної модифікації поверхонь дротяним електродом.

11. На основі комплексу експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано розрахунково-експериментальну методику і отримано рівняння для розрахунку величини розподіленого зовнішнього навантаження, що діє на дріт при різанні певних груп сталей і твердих сплавів. Отримані результати дають змогу на етапі проектування технологічного процесу розрахувати дійсну форму дротяного електрода і, з її урахуванням, будувати технологію обробки і відповідну траєкторію руху приводів верстата.

12. Розроблено і випробувано методику математичного комп'ютерного розрахунку розподілу густини технологічного струму в тривимірній постановці для конфігурації плоский анод – циліндричний катод, яка допомагає прогнозувати точність формоутворення при проектуванні процесу обробки за комбінованою технологією послідовного застосування ЕЕДВ та ЕХРО ДЕ. Використання результатів моделювання дає змогу визначити припуски на товщину заготовки для повного усунення зон підвищеного електрохімічного розчинення на гранях деталі.

13. Структуризовані та систематизовані результати проведеного комплексу експериментальних і теоретичних досліджень є науковими засадами розробленої САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом, яка дає можливість проектувати ефективні технологічні процеси і, відповідно, отримувати деталі з заданими та контрольованими параметрами геометричної точності, мікрогеометрії поверхні та структури поверхневих шарів. Розроблена САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом пройшла успішну апробацію при проектуванні технологічних процесів виготовлення полюсів квадрупольних лінз для іонних мікроскопів. Крім того, результати досліджень впроваджено у виробничих процесах підприємств ТОВ «Черкасиелеватормаш», ДП НВК «Фотоприлад» (м. Черкаси), ЗАТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес» (м. Запоріжжя), що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Осипенко В. І. Фізика і технологія електроерозійного дротяного вирізання: монографія / В. І. Осипенко, О. П. Плахотний, Н. В. Філімонова ; Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси, 2019. – 251 с. *Здобувачем запропоновано ряд математичних моделей теплової руйнації матеріалу за дії іскрових розрядів, формоутворення поверхні гнучким дротяним електродом, що становлять наукові засади ЕЕДВ.*
2. Plakhotnyi O. Forming and finishing surface by sequential electrochemical-electrodischarge machining of precision magnetic optics parts / O. Plakhotnyi, V. Osypenko // Int. J. Machining and Machinability of Materials. – 2020. – Vol. 22. – No. 3/4. – P. 331–347. DOI: 10.1504/IJMMM.2020.107061. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus. Здобувачем запропоновано й експериментально перевірено методику розрахунку параметрів електрохімічної обробки дротяним електродом гіперболічної лінійчатої поверхні після електроерозійного вирізання.*
3. Osypenko V. I. Determination of power factors affecting surface formation in the process of electrical discharge machining / V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2019. – Vol. 55. – No. 6. – P. 621–629.

DOI: 10.3103/S1068375519060073. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus. Здобувачеві належать теоретичні розрахунки кількісних значень силових чинників, що діють на дротяний електрод за ЕЕДВ, які лягли в основу експериментальної частини роботи.*

4. Osypenko V. Principles of the express method for controlling interelectrode space condition during wire electrochemical processing / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Journal of Electrochemical Science and Engineering. – 2019. – № 9 (4). – P. 269–280. DOI: 10.5599/jese.660. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в WoS-(ESCI). Здобувачем запропоновано метод та показано його практичну можливість оперативного контролю стану міжелектродного проміжку за ЕХРО дротяним електродом.*

5. Plakhotnyi O. Computer modeling of forming surface by sequential wire electrodischarge-electrochemical machining / Plakhotnyi O., Timchenko O., Osypenko V. // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2353 – P. 744–754. Online: <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper59.pdf>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus. Здобувачем розроблено математичні засади комп'ютерного моделювання процесу формування поверхонь за комбінованою послідовною технологією електроерозійного вирізання та електрохімічної обробки дротяним електродом.*

6. Osypenko V. Surface forming features of new combined wire electrical discharge-electrochemical machining technology / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Non-conventional Technologies Review. – 2019. – № 23 (2). – P. 52–57. Online: <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/223>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в ProQuest, EBSCOhost, DOAJ, Google Scholar, Index Copernicus. Здобувачем виявлено закономірності впливу режимів ЕЕДВ та ЕХРО незмінним дротяним електродом на структуру поверхневих шарів та мікрогеометрію поверхонь в обраній групі матеріалів.*

7. Determination of microhardness and depth of thermally hardening zone in quality carbon structural steel after WEDM using different discharge parameters / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O., Kondakov A. // Nonconventional Technologies Review. – 2020. – № 24 (3). – P. 31–39. Online: <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/294>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в ProQuest, EBSCOhost, DOAJ, Google Scholar, Index Copernicus. На основі представлених результатів експериментальних досліджень здобувачем встановлено, що домінуючий вплив на формування товщини термічно зміцненого шару має тривалість імпульсу струму.*

8. Осипенко В. И. Определение силовых факторов, влияющих на формообразование поверхности при электроэрозионной вырезной обработке / В. И. Осипенко, А. П. Плахотный // Электронная обработка материалов. – 2018. – № 6. – С. 9–18. Online: <http://eom.phys.asm.md/ru/journal/shortview/1674>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в EBSCO, DOAJ. Здобувачем проведено обчислювальні експерименти на основі запропонованої розрахунково-експериментальної методики для визначення зовнішнього навантаження, що діє на дріт за електроерозійного різання певних груп сталей та твердих сплавів.*

9. Осипенко В. И. Поляризация импульсным током анода з вуглецевої сталі при використанні латунного катода в водному розчині NaCl / Осипенко В. И., Плахотный О. П., Тімченко О. В. // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. праць (Технічні науки). – 2018. – Вип. 37. – С. 97–105. *Стаття у фаховому виданні Ук-*

раїни, що індексується в DOAJ, Google Scholar, Index Copernicus, OCLC WorldCAT, BASE, SIS, ResearchBib, I2OR, CiteFactor, ESJI, DIIF, PBN. Здобувачем виявлено закономірності та встановлено рівні вагомості впливу технологічних чинників на динаміку поляризації анода з вуглецевої сталі за використання латунних електродів у водному розчині солі NaCl.

10. Плахотний О. П. Моделювання впливу амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів на процеси анодного розчинення при електрохімічній обробці дрітним електродом / О. П. Плахотний // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2018. – № 3. – С. 87–96. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

11. Плахотний О. П. Підвищення точності розмірної електрохімічної обробки дрітним електродом на основі моделювання тривимірних електростатичних полів / О. П. Плахотний // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2018. – № 1. – С. 60–66. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

12. Осипенко В. І. Оцінка адекватності критеріїв локалізації процесу анодного розчинення при використанні циліндричних дрітних електродів / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Тімченко О. В. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – № 2. – С. 84–91. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat. Здобувачем запропоновано статистичний ймовірнісний підхід для наукового обґрунтування нового критерію визначення рівня локалізації процесу електрохімічного розчинення середньовуглецевих сталей за використання схеми обробки з циліндричними дрітними електродами та коаксіальною подачею електроліту.*

13. Osypenko V. Modeling of nozzle in jet pump mode for electrical discharge and electrochemical machining / Osypenko V., Plakhotnyi O., Denysenko A. // Technological Complexes. – 2016. – № 1 (13). – Р. 40–46. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus, CiteFactor, Google Scholar, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, SIS, ERIH PLUS. Здобувачем проведено чисельне моделювання роботи сопла в режимі струменевого насоса в процесі ЕЕДВ та ЕХРО для забезпечення необхідної швидкості потоку рідини коаксіально з дрітним електродом, стабільності та однорідності робочого середовища в зоні обробки.*

14. Осипенко В. І. Розрахунок мікрогеометричних параметрів поверхневого шару при електроерозійному дрітному вирізанні повного зйому / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Нестеренко І. М. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2015. – № 3. – С. 95–102. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat. Здобувачем отримано основні співвідношення для визначення взаємозв'язку параметрів шорсткості поверхні з геометричними параметрами одиничної ерозійної лунки.*

15. Osipenko V. I. Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode / Osipenko V. I., Plakhotny A. P., Denisenko A. Yu. // Праці Одеського політехнічного

університету. – 2014. – Вип. 1 (43). – С. 55–60. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, «Україніка наукова».* Здобувачем отримано аналітичний розв'язок крайової задачі анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають нерівномірні по товщині електрохімічні характеристики.

16. Осипенко В. И. Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволочным электродом / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Билан А. В. // Вісник СевНТУ : зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 118. – С. 107–112. – Серія : Машиноприладобудування та транспорт. *Стаття у фаховому виданні України. Здобувачем отримано аналітичний розв'язок задачі про розподіл густини струму на поверхні деталі для технологічної схеми ЕХРО ДЕ.*

17. Моделювання та керування впливом поперечної жорсткості дротяного електрода на точність електроерозійного утворення конічних поверхонь / Поляков С. П., Осипенко В. І., Плахотний О. П., Ступак Д. О., Шитик О. Ю. // Вибрації в техніці та технологіях. – 2007. – № 3 (48). – С. 42–45. *Стаття у фаховому виданні України. Здобувачем розвинуто математичну модель форми дротяного електрода з урахуванням поперечної жорсткості за чотирикоординатного електроерозійного різання.*

18. Моделювання теплових процесів руйнації електродів розрядами, характерними для електроерозійного вирізання / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Полонський Л. Г., Степчин А. Я. // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2006. – № 4. – С. 63–70. *Стаття у фаховому виданні України. Здобувачем обґрунтовано постановку нелінійної крайової задачі теплопровідності з рухомими границями фаз для умов ЕЕДВ, підібрано ефективний чисельний метод її розв'язку.*

19. Модель для розрахунку викривлень дрового електрода при чотирикоординатній електроерозійній обробці / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Роман В. В., Ступак Д. О. // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2003. – № 5. – С. 77–81. *Стаття у фаховому виданні України. Здобувачем отримано аналітичний розв'язок задачі про форму дротяного електрода при поперечному навантаженні, характерному за чотирикоординатного електроерозійного вирізання.*

20. Осипенко В. И. Новые технические решения в управлении характеристиками импульсов при электроэрозионной вырезной обработке проволочным электродом / В. И. Осипенко, А. П. Плахотный // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 275–277. *Стаття у фаховому виданні України. Здобувачем проведено дослідження процесів формування ерозійної лунки залежно від енергії імпульсів та діаметра каналу іскрового розряду з метою розробки принципово нового генератора коротких імпульсів для ЕЕДВ.*

21. Підвищення точності чотирикоординатної електроерозійної обробки складноконтурних деталей / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Ступак Д. О., Цвітохін М. С. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – № 1. – С. 56–60. *Стаття у фаховому виданні України. Здобувачем виділено технологічні параметри ЕЕДВ, які суттєво впливають на точність формоутворення при виготовленні складноконтурних деталей.*

22. Термоупругая модель внутриэлектродных процессов электроэрозионной технологии / Поляков С. П., Осипенко В. И., Плахотный А. П., Тригуб О. А. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. трудов. – Донецк : ДонГТУ,

2001. – Вып. 17. – С. 168–171. *Стаття у фаховому виданні України. Здобувачем обґрунтовано вибір граничних умов, що відображають характерну локальність теплового навантаження на дрітаний електрод в термopружній математичній моделі.*

23. Плахотний О. П. Формування твердосплавних різальних елементів фасонного інструменту за допомогою електроерозійної обробки / О. П. Плахотний, С. П. Поляков // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 1998. – № 1. – С. 62–66. *Стаття у фаховому виданні України. Здобувачем отримано математичні формули, що лежать в основі розробленої методики проектування процесу формоутворення складнопрофільних деталей різального інструменту за ЕЕДВ.*

24. Пристрій для подачі робочої рідини в міжелектродний проміжок : пат. на винахід № 117497 Україна : МПК В23Н 7/36 / В. І. Осипенко, А. Ю. Денисенко, О. П. Плахотний. – № а201603393 ; заявл. 01.04.2016 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15. *Участь у створенні винаходу всіх авторів однакова.*

25. Osypenko V. I. Localization criteria of the electrochemical machining process using cylindrical wire electrodes / Osypenko V. I., Plakhotnyi O. P., Timchenko O. V. // Практическое значение современных научных исследований '2019 : сб. тезисов междунар. науч. конф., 8–9 апр. 2019 г. – Одесса, 2019. – С. 5–8.

26. Osypenko V. Features of the single crater geometry formation in wire electrical discharge machining using modern current generators / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф., 15–16 трав. 2019 р. – Чернігів, 2019. – С. 47–48.

27. Плахотний О. П. Моделирование потока электролита та оцінка його впливу на процеси анодного розчинення при електрохімічній обробці дрітаним електродом / О. П. Плахотний, А. Ю. Денисенко // Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences : сб. наук. праць Міжнар. наук.-практ. конф., Dec. 27–28, 2017. – Radom, Republic of Poland, 2017. – С. 130–134.

28. Осипенко В. І. Моделирование работы сопла для технологического комплекса электроерозийной та електрохімічної обробки / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Денисенко А. Ю. // Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів «ТК-2016» : сб. наук. праць ІV Міжнар. наук.-техн. конф., 26–28 трав. 2016 р. – Луцьк, 2016. – С. 36.

29. Плахотный А. П. Моделирование процессов разрушения поверхностных слоев инструментальных сталей при электрохимической обработке проволочным электродом / Плахотный А. П., Осипенко В. И., Билан А. В. // Актуальные проблемы прочности : материалы 51-й междунар. конф., 16–18 мая 2011 г. – Харьков, 2011. – С. 215–216.

30. Автоматизированный электроэрозионный вырезной станок на линейных двигателях с газовой смазкой в направляющих / С. П. Поляков, А. И. Карогодский, В. И. Осипенко, Т. Б. Юхмич, А. П. Плахотный // Аэрокосмический комплекс: конверсия и технологии : тезисы докл. науч.-техн. конф., 11–14 сент. 1995 г. – Житомир, 1995. – С. 103–104.

31. Плахотный А. П. Электроэрозионная обработка и эксплуатация фасонных фрез / Плахотный А. П., Поляков С. П., Постригань С. П. // Высокоэффективные технологии в машиностроении : материалы конф., 28–30 окт. 1998 г. – Харьков, 1998. – С. 69.

32. Осипенко В. И. Моделирование и управление технологическим процессом 4-х координатной электроэрозионной обработки / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Автоматика – 97 : праці 4-ї Укр. конф. з автоматичного управління, 23–28 черв. 1997 р. – Черкаси, 1997. – Т. V. – С. 70.

33. Осипенко В. И. Математические и технологические аспекты САПР 4-х координатной электроэрозионной обработки / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Оснастка-97 : тезисы докл. науч.-техн. конф., 20–21 марта 1997 г. – К., 1997. – С. 33–35.

34. Осипенко В. И. Исследование прогибов проволочного электрода-инструмента и оптимизация стратегии обработки сложноконтурных деталей / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Высокоэффективные технологии в машиностроении : тезисы докл. на Междунар. конф., посвящ. 100-летию КПИ. – Алушта, сентябрь 1996 г.
35. Осипенко В. І. Розрахунок прогину дротяного електрода при 4-координатній електроерозійній різці / В. І. Осипенко, О. П. Плахотний // Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. – 1997. – № 19–20. – С. 17–18.

АНОТАЦІЯ

Плахотний О. П. **Наукові засади комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» (13 – Механічна інженерія). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Роботу присвячено подальшому розвитку науково-технологічних засад комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки, створенню системи багатofакторного розрахунку параметрів обладнання і технологій для досягнення максимальних технологічних характеристик процесу та отримання можливості керованого формування поверхонь з новими заданими геометричними і фізико-хімічними параметрами.

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічну проблему підвищення точності обробки нежорстким дротяним електродом та покращення цілісності поверхні після дії іскрових розрядів шляхом застосування нетермічної технології електрохімічної розмірної обробки послідовно після електроерозійного вирізання незмінним дротяним електродом.

Ключові слова: електроерозійна вирізна обробка, імпульсна електрохімічна обробка, комбінована технологія ЕЕДВ/ЕХРО, формоутворення поверхні, прогин дротяного електрода, шорсткість поверхні, переплавлений шар, зона термічного впливу, фінішування поверхні.

АННОТАЦИЯ

Плахотный А. П. **Научные основы комбинированной технологии электроэрозионной и электрохимической обработки проволочным электродом.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.07 «Процессы физико-технической обработки» (13 – Механическая инженерия). – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2021.

Работа посвящена дальнейшему развитию научно-технологических основ комбинированной проволочной электроэрозионной и электрохимической обработки, созданию системы многофакторного расчета параметров оборудования и технологий для достижения максимальных технологических характеристик процесса и получения возможности управляемого формирования поверхностей с новыми заданными геометрическими и физико-химическими параметрами.

В диссертационной работе решена научно-техническая проблема повышения точности обработки нежестким проволочным электродом и улучшения целостности поверхности после действия искровых разрядов путем применения нетермической технологии электрохимической размерной обработки последовательно после электроэрозионного вырезания неизменным проволочным электродом.

Ключевые слова: электроэрозионная вырезная обработка, импульсная электрохимическая обработка, комбинированная технология ЭЭВО/ЭХРО, формообразования поверхности, прогиб проволочного электрода, шероховатость поверхности, переплавленный слой, зона термического влияния, финиширование поверхности.

ABSTRACT

Plakhotnyi O. P. **Scientific principles of the combined technology of wire electro-discharge and electrochemical machining.** – Qualification scientific work presented as manuscript.

Thesis for doctor degree of technical sciences by specialty 05.03.07 "Processes of Physical and Technical Processing" (13 – Mechanical engineering). – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The work is devoted to further development of scientific and technological principles of combined wire electrical discharge and wire electrochemical machining (WEDM and WECM), creation of a system of multifactor calculation of equipment parameters and technologies to achieve maximum technological characteristics of the process and obtain controlled surface formation with new geometric and physicochemical parameters.

The work deals with the establishment of physical and technological patterns of material removal using electrical discharges and the formation of near-surface layers of electrodes by discharges of short duration and energy.

Based on the analysis of known results of experimental and theoretical studies, simplifying assumptions are formulated that allow to conduct computational experiments using a three-dimensional model of thermal processes of electrode material removal based on the numerical solution of three-phase thermal conductivity problem without significant loss of adequacy of a mathematical model of real physical processes, which occur in the area of the spark discharge.

The method of determining the depth of the HAZ and the parameters of surface roughness formed by the sequence of discharges typical for WEDM cutting is proposed and substantiated.

The work presents the results of studies of the near-surface anodic dissolution processes during electrochemical machining with microsecond current pulses.

The complex of experimental researches has specified the values of current efficiency coefficients depending on the pulse current density and the structure formed by preliminary heat treatment of the material during the electrochemical dissolution of ARMCO iron and steels H12F1, U8A, SchH15, Steel 45.

The use of the size of the dissolution zone and the excesses of the current density distribution for WECM technologies as criteria for estimating the localization of the anodic dissolution process is proposed and substantiated.

Based on the comparison of the obtained electrolyte flow velocity distribution and the accurate analytically presented current distribution on the anode surface, a method of coordinating the hydraulic modes of electrolyte flow with the amplitude-time parameters of the power supply is proposed. The use of this method allows for each case of the height of the part, the size of the inter-electrode gap, the parameters of the electrolyte supply to design the amplitude-time parameters of the current pulses, which ensure uniformity and stability of dissolution throughout the machining height. Experimental verification has confirmed the effectiveness of the practical use of the obtained research results and their contribution to improving the stability and predictability of electrochemical dimensional machining with a wire electrode as a technology.

An improved method for calculating quantitative parameters of the process of anodic dissolution of WEDM-modified surface with uneven in depth electrochemical characteristics is proposed, which allows to specify the numerical values of the coefficients of electrochemical dissolution of steel surfaces' layers and can provide a significant increase in the accuracy of calculations of parameters of the processes of electrochemical modification of surfaces by a wire electrode.

The work is devoted to the development of methods that ensure the accuracy of the formation of elements of complex contour surfaces by a combined technology of electrical discharge and electrochemical machining with a wire electrode.

On the basis of a complex of experimental and theoretical researches, the computational-experimental technique is offered. Also the equations for calculation of the value of the distributed external load applied to a wire during cutting of certain groups of steels and hard alloys are obtained. The obtained results allow at the design stage of technological process to calculate the actual shape of the wire electrode and, taking it into account, to build the machining technology and the corresponding trajectory of machine drives.

A method of mathematical computer calculation of technological current density distribution in three-dimensional formulation for flat anode and cylindrical cathode configuration has been developed and tested, which helps to predict the accuracy of shaping when designing the machining process of combined technology of sequential application of WEDM and WECM cutting.

In the work the results of a complex of experimental and theoretical researches are structured and systematized and the CAD of combined electrical discharge and electrochemical machining of steels by a wire electrode is developed, which allows to design effective technological processes and, accordingly, to receive details with predicted and controlled parameters of geometrical accuracy, surface microgeometry and structure of surface layers.

Developed CAD of combined WEDM and WECM of steels has been successfully tested in the design of technological processes for the manufacture of poles of quadrupole lenses for ion microscopes. In addition, the research results were implemented in the production processes of "Cherkasyelevatormash" LLC, "Fotoprilad" State Enterprise (Cherkasy), "Motor Sich" CJSC, "Progress" State Enterprise (Zaporizhia), which has been confirmed by the relevant acts.

Keywords: wire electrical discharge machining, pulsed electrochemical machining, WEDM/ECM combined process, surface shape accuracy, wire-electrode deflection, surface roughness, recast layer, heat affected zone, surface finishing.

Формат 60x84 1/16. Папір офісний. Гарнітура Times New Roman. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 2,4. Тираж 100 прим. Зам. № 21-25.

Редакційно-видавничий відділ

Черкаського державного технологічного університету
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.

red_vidav@chdtu.edu.ua

Віддруковано: ФОП Попадюк С.В., бульвар Шевченка, 389, м. Черкаси.